



TREBALL FINAL DE MÀSTER



ESCOLA
POLITÈCNICA SUPERIOR
UNIVERSITAT DE LLEIDA
INSPIRING THE FUTURE

Estudiant: **Santiago Maestro Balaguer**

Titulació: Màster en Enginyeria Industrial

Títol de Treball Final de Màster: Posta en marxa i avaluació experimental d'una càmera RGB-D: Microsoft Azure Kinect

Director/a: Eduard Gregorio López

Presentació

Mes: Juny

Any: 2020



Universitat de Lleida
Escola Politècnica Superior

Posta en marxa i avaluació experimental d'una càmera RGB-D:

Microsoft Azure Kinect

Santiago Maestro Balaguer



ÍNDEX DE CONTINGUTS

ÍNDEX GENERAL

ÍNDEX DE CONTINGUTS	2
FULL IDENTIFICATIU	13
TERMINOLOGIA	16
1. INTRODUCCIÓ	20
1.1 Càmeres RGB-D	20
1.2 Camps d'aplicació de les càmeres RGB-D	21
1.3 Càmeres estereoscòpiques i de <i>Time of Flight</i> (ToF)	22
1.3.1 Càmeres estereoscòpiques	22
1.3.2 Càmeres ToF	23
2. ANTECEDENTS	26
2.1 Motivacions	26
2.2 Estudis previs	26
2.2.1 Estudis existents	26
2.2.2 Selecció de la càmera	28
3. OBJECTE	38
4. ESTRUCTURA DE L'ESTUDI	39
5. EINES UTILITZADES	40
5.1 Eines Hardware	40
5.2 Eines Software	43
5.1.1 Azure Kinect Viewer v1.3.0	43
5.1.2 CloudCompare v2.10.2	48
5.1.3 Altres programes utilitzats	50
6. POSTA EN MARXA DEL SENSOR	51
6.1 Primers passos	51

6.1.1	Test general	51
6.1.2	Tests de configuracions.....	56
6.1.3	Test de sistemes de referència i IMU.....	58
6.1.4	Primeres captures i gravacions	66
6.2	Programa dissenyat	68
6.3	Calibratge de la càmera.....	72
6.3.1	Invalidació de píxels	72
6.3.2	Mixed píxels	75
6.3.3	Errors de la càmera	76
6.3.4	Rangs de la càmera de profunditat.....	77
6.3.5	Correcció de l'angle dels sistemes de referència.....	85
6.3.6	Intensitat i intensitat corregida en distància	89
6.3.7	Funció de distribució de reflectància bidireccional	92
7.	AVALUACIÓ EXPERIMENTAL EN CONDICIONS D'INTERIOR	94
7.1	Descripció de l'assaig realitzat	94
7.2	Resultats i discussió	103
7.2.1	Taules resum de les captures	103
7.2.2	Resultats de cada càmera	108
7.2.3	Discussió dels resultats	119
7.3	Exactitud i precisió	122
8.	AVALUACIÓ EXPERIMENTAL EN CONDICIONS EXTERIORS	137
8.1	Descripció de l'assaig realitzat	137
8.2	Resultats i discussió	140
8.2.1	Taula resum de les captures	140
8.2.2	Discussió dels resultats	144
9.	CONCLUSIONS I TREBALL FUTUR	146

BIBLIOGRAFIA.....	148
ANNEXOS.....	151
ANNEX 1. Fitxa tècnica de la Azure Kinect	151
ANNEX 2. Rangs de la càmera de profunditat (taules expandides)	152
ANNEX 3. Resultats de l'assaig d'interior (taules expandides)	160
ANNEX 4. Taules amb les repeticions en l'estudi de precisió i exactitud.....	162
ANNEX 5. Resultats de l'assaig d'exterior	183

ÍNDIX FIGURES

Figura 1. Esquema dels principals mètodes de mesurament de distància 3D.....	20
Figura 2. Utilització d'una càmera 3D en un braç robòtic.....	21
Figura 3. Càmera estereoscòpica Kodak Stereo 35, fabricada al 1945.....	22
Figura 4. Esquematització del funcionament d'un sistema ToF d'ona pulsada.....	23
Figura 5. Esquematització de la captació de les 4 mostres d'un sistema ToF d'ona continua.....	24
Figura 6. Configuració d'una càmera Ensenso XR amb projector central i dos càmeres laterals.....	28
Figura 7. Comparativa dels models XR30 i XR36 de la sèrie Ensenso.....	29
Figura 8. Azure Kinect de Microsoft.....	31
Figura 9. Esquema dels elements que conformen la Azure Kinect.....	32
Figura 10. Intel RealSense D435.....	33
Figura 11. Vista en detall dels components de captació de la Intel Realsense D435.....	34
Figura 12. Esquema dels elements que conformen la Intel RealSense D435.....	34
Figura 13. Microsoft Kinect V2.....	40
Figura 14. Esquema de la posició de la càmera de profunditat de la Kinect V2.....	41
Figura 15. Vista en detall dels components de captura de la Kinect V2.....	42
Figura 15. Interfície del programa “Azure Kinect Viewer 1.3.0”.....	44
Figura 17. Vista en detall dels menús de la finestra de configuració del visualitzador.....	45
Figura 18. Lectures en temps real de la IMU del dispositiu.....	46
Figura 19. Visualitzador de les lectures de la bateria de micròfons i del núvol de punts.....	47
Figura 20. Interfície del programa “CloudCompare v2.10.2”.....	49
Figura 21. Exemple de l'ús del CloudCompare en aquest estudi.....	50
Figura 22. Esquema de components de la Azure Kinect, proporcionat pel fabricant.....	51
Figura 23. Azure Kinect amb la tapa protectora extreta.....	51
Figura 24. Connexions que necessita la Azure Kinect per a la seva arrancada.....	52
Figura 25. LED indicatiu de que s'han realitzat correctament les connexions de la càmera.....	53
Figura 26. Imatge frontal de la Azure Kinect en funcionament.....	53
Figura 27. Missatge d'entrada del visualitzador de la càmera.....	54
Figura 28. Versió de Firmware de la Azure Kinect utilitzada en aquest estudi.....	54
Figura 29. Test del funcionament general del dispositiu a través del visualitzador.....	55
Figura 30. Finestra d'opcions per la càmera de color i configuracions possibles d'acord al fabricant.....	56

Figura 31. Comparativa dels diferents modes de profunditat de la Azure Kinect.....	57
Figura 32. Esquema del sistema de coordenades 2D associat a les càmeres de profunditat i color.....	58
Figura 33. Sistemes de referència 3D, facilitats pel fabricant.....	59
Figura 34. Comprovació del funcionament del sistema de referència de la càmera de profunditat.....	60
Figura 35. Sentits positius dels sistema de referència 3D de l'acceleròmetre i el giroscopi.....	61
Figura 36. Gràfiques en repòs.....	62
Figura 37. Gràfiques amb moviment en x.....	62
Figura 38. Gràfiques amb moviment en y.....	63
Figura 39. Gràfiques amb moviment en z.....	63
Figura 40. Gràfiques amb gir "roll".....	64
Figura 41. Gràfiques amb gir "pitch".....	65
Figura 42. Gràfiques amb gir "yaw".....	65
Figura 43. Consola de comandaments per a una gravació de 5 segons amb configuració per defecte..	66
Figura 44. Arxiu generat, missatge de entrada al visualitzador i gravació en el visualitzador.....	67
Figura 45. Captura en mode NFOV i captura en mode WFOV.....	72
Figura 46. Captura de profunditat en mode NFOV i fusió de imatge de color i profunditat.....	73
Figura 47. Captura de profunditat en mode WFOV i captura IR.....	73
Figura 48. Invalidació de píxels en una cantonada.....	74
Figura 49. Captura del taulell d'escacs i taulell de cartró amb efecte de <i>mixed pixels</i>	75
Figura 50. Configuracions de la càmera de profunditat facilitades pel fabricant.....	77
Figura 51. Esquematzació del rang de la càmera de color i profunditat, facilitada pel fabricant.....	77
Figura 52. Blanc 1: On s'han estudiat les coordenades de A, B, C, D i E, així com L1, L2, L3 i L4.....	78
Figura 53. Blanc 2: On s'han estudiat les longituds L5, L6, L7 i L8 i D1.....	79
Figura 54. Blanc 3: On s'han estudiat les longituds L8, L9 i L10.....	79
Figura 55. Representació dels errors per coordenada en funció de la distància (NFOV Unbinned).....	86
Figura 56. Representació dels errors per coordenada en funció de la distància (NFOV 2x2 Binned)..	86
Figura 57. Representació dels errors per coordenada en funció de la distància (WFOV Unbinned)....	87
Figura 58. Representació dels errors per coordenada en funció de la distància (WFOV 2x2 Binned).	87
Figura 59. Exemple de núvol de punts en el CloudCompare amb intensitat i menú	89
Figura 60. Esquema del vector de distància d'un punt A respecte l'origen del sistema de referència..	90
Figura 61. Exemple de núvol de punts en el CloudCompare amb rang de correcció i menú.....	91

Figura 62. Núvols de punts del CloudCompare on desapareixen zones de la taula.....	92
Figura 63. Taulell d'escacs amb la distribució de punts seleccionada per l'assaig.....	94
Figura 64. Esquematització del muntatge realitzat per fer l'assaig.....	97
Figura 65. Muntatge realitzat per l'assaig d'interior.....	97
Figura 66. Imatges de la disposició del taulell d'escacs enfront les càmeres utilitzades en l'assaig.....	98
Figura 67. Imatges de la utilització del nivell de bombolla per controlar inclinació de les càmeres.....	99
Figura 68. Imatges de la utilització del mesurador làser per mantenir l'alineació de càmera i blanc.....	100
Figura 69. Imatges de la utilització del luxímetre per obtenir lectures de intensitat lluminosa.....	101
Figura 70. Exemple del tractament del núvol de punts per a una captura a una certa distància.....	102
Figura 71. Comparativa de l'error per distància en les 3 coordenades de la Azure (NFOV Unb.).....	116
Figura 72. Comparativa de l'error per distància en les 3 coordenades de la Azure (WFOV Unb.).....	116
Figura 73. Comparativa de l'error per distància en les 3 coordenades de Kinect V2.....	117
Figura 74. Comparativa de l'error per punt, de càmeres i modes, per totes les coordenades.....	117
Figura 75. Comparativa gràfica entre exactitud i precisió.....	122
Figura 76. Blanc 1: Taulell d'escacs i Blanc 2: Taulell cartró. En vermell els punts estudiats.....	123
Figura 77. Gràfic de l'evolució de l'exactitud amb la distància, blanc 1 i Azure Kinect.....	129
Figura 78. Gràfic de l'evolució de la precisió amb la distància, blanc 1 i Azure Kinect.....	129
Figura 79. Gràfic de l'evolució de l'exactitud amb la distància, blanc 2 i Azure Kinect.....	130
Figura 80. Gràfic de l'evolució de la precisió amb la distància, blanc 2 i Azure Kinect.....	130
Figura 81. Gràfic de l'evolució de l'exactitud amb la distància, blanc 1 i Kinect V2.....	131
Figura 82. Gràfic de l'evolució de la precisió amb la distància, blanc 1 i Kinect V2.....	131
Figura 83. Gràfic de l'evolució de l'exactitud amb la distància, blanc 2 i Kinect V2.....	132
Figura 84. Gràfic de l'evolució de la precisió amb la distància, blanc 2 i Kinect V2.....	132
Figura 85. Gràfic comparatiu de l'exactitud mitja per cada càmera i blanc.....	133
Figura 86. Gràfic comparatiu de la precisió mitja per cada càmera i blanc.....	133
Figura 87. Muntatge realitzat per l'assaig en condicions exteriors.....	137
Figura 88. Esquematització de l'error produït al prendre les mesures en condicions d'exterior.....	138
Figura 89. Azure Kinect amb el nivell de bombolla i mesurador d'inclinacions en exterior.....	139
Figura 90. Imatges de les condicions ambientals i meteorològiques en que es va realitzar l'assaig...	141
Figura A1. Característiques tècniques i mesures de la Azure Kinect.....	151

ÍNDEX TAULES

Taula 1. Resum i comparativa dels paràmetres de interès de les càmeres analitzades.....	35
Taula 2. Resultats del blanc 1 per al mode NFOV Unbinned.....	80
Taula 3. Resultats del blanc 2 per al mode NFOV Unbinned.....	80
Taula 4. Resultats del blanc 3 per al mode NFOV Unbinned.....	80
Taula 5. Resultats del blanc 1 per al mode NFOV 2x2 Binned.....	81
Taula 6. Resultats del blanc 2 per al mode NFOV 2x2 Binned.....	81
Taula 7. Resultats del blanc 3 per al mode NFOV 2x2 Binned.....	81
Taula 8. Resultats del blanc 1 per al mode FOV Unbinned.....	82
Taula 9. Resultats del blanc 2 per al mode FOV Unbinned.....	82
Taula 10. Resultats del blanc 1 per al mode FOV Unbinned.....	82
Taula 11. Resultats del blanc 1 per al mode WFOV 2x2 Binned.....	83
Taula 12. Resultats del blanc 2 per al mode WFOV 2x2 Binned.....	83
Taula 13. Resultats del blanc 3 per al mode WFOV 2x2 Binned.....	83
Taula 14. Captures de la Azure Kinect a diferents distàncies utilitzant el mode NFOV Unbinned....	104
Taula 15. Captures de la Azure Kinect a diferents distàncies utilitzant el mode WFOV Unbinned...	106
Taula 16. Captures de la Kinect V2 a diferents distàncies.....	107
Taula 17. Informació de l'assaig realitzat per la Azure Kinect (NFOV Unbinned).....	109
Taula 18. Informació de l'assaig realitzat per la Azure Kinect (WFOV Unbinned).....	109
Taula 19 Informació de l'assaig realitzat per la Kinect V2.....	109
Taula 20. Resultats de l'assaig per l'Azure Kinect (NFOV Unbinned).....	110
Taula 21. Resultats de l'assaig per l'Azure Kinect (WFOV Unbinned).....	111
Taula 22. Resultats de l'assaig per la Kinect V2.....	112
Taula 23. Error per distància, per càmera i mode, a cada distància de les coordenades x, y i z.....	114
Taula 24. Error per punt per càmera i mode, a cada coordenada dels punts estudiats.....	115
Taula 25. Resultats de precisió i exactitud, taulell d'escacs i A.K (NFOV Unbinned).....	125
Taula 26. Resultats de precisió i exactitud, taulell de cartró i A.K (NFOV Unbinned).....	126
Taula 27. Resultats de precisió i exactitud, taulell d'escacs i Kinect V2.....	127
Taula 28. Resultats de precisió i exactitud, taulell de cartró i Kinect V2.....	128
Taula 29. Informació de l'assaig realitzat a exterior amb la Azure Kinect (NFOV Unbinned).....	140

Taula 30. Captures de la Azure Kinect (NFOV Unbinned) a diferents distàncies de la càmera.....	142
Taula A1. Rangs de la càmera de profunditat de la Azure Kinect (NFOV Unbinned) pel blanc 1.....	152
Taula A2. Rangs de la càmera de profunditat de la Azure Kinect (NFOV Unbinned) pel blanc 2.....	153
Taula A3. Rangs de la càmera de profunditat de la Azure Kinect (NFOV Unbinned) pel blanc 3.....	153
Taula A4. Rangs de la càmera de profunditat de la Azure Kinect (NFOV 2x2 Binned) pel blanc 1...	154
Taula A5. Rangs de la càmera de profunditat de la Azure Kinect (NFOV 2x2 Binned) pel blanc 2...	155
Taula A6. Rangs de la càmera de profunditat de la Azure Kinect (NFOV 2x2 Binned) pel blanc 3...	155
Taula A7. Rangs de la càmera de profunditat de la Azure Kinect (WFOV Unbinned) pel blanc 1.....	156
Taula A8. Rangs de la càmera de profunditat de la Azure Kinect (WFOV Unbinned) pel blanc 2.....	157
Taula A9. Rangs de la càmera de profunditat de la Azure Kinect (WFOV Unbinned) pel blanc 3.....	157
Taula A10. Rangs càmera de profunditat de la Azure Kinect (WFOV 2x2 Binned) pel blanc 1.....	158
Taula A11. Rangs càmera de profunditat de la Azure Kinect (WFOV 2x2 Binned) pel blanc 2.....	159
Taula A12. Rangs càmera de profunditat de la Azure Kinect (WFOV 2x2 Binned) pel blanc 3.....	159
Taula A13. Resultats de l'assaig d'interior amb la Azure Kinect (NFOV Unbinned).....	160
Taula A14. Resultats de l'assaig d'interior amb la Azure Kinect (WFOV Unbinned).....	161
Taula A15. Resultats de l'assaig d'interior amb la Kinect V2.....	162
Taula A16. Resultats precisió i exactitud del blanc 1 amb la A.K (NFOV Unbinned) a 0,5 m.....	163
Taula A17. Resultats precisió i exactitud del blanc 1 amb la A.K (NFOV Unbinned) a 1,0 m.....	164
Taula A18. Resultats precisió i exactitud del blanc 1 amb la A.K (NFOV Unbinned) a 1,5 m.....	165
Taula A19. Resultats precisió i exactitud del blanc 1 amb la A.K (NFOV Unbinned) a 2,0 m.....	166
Taula A20. Resultats precisió i exactitud del blanc 1 amb la A.K (NFOV Unbinned) a 2,5 m.....	167
Taula A21. Resultats precisió i exactitud del blanc 2 amb la A.K (NFOV Unbinned) a 0,5 m.....	168
Taula A22. Resultats precisió i exactitud del blanc 2 amb la A.K (NFOV Unbinned) a 1,0 m.....	169
Taula A23. Resultats precisió i exactitud del blanc 2 amb la A.K (NFOV Unbinned) a 1,5 m.....	170
Taula A24. Resultats precisió i exactitud del blanc 2 amb la A.K (NFOV Unbinned) a 2,0 m.....	171
Taula A25. Resultats precisió i exactitud del blanc 2 amb la A.K (NFOV Unbinned) a 2,5 m.....	172
Taula A26. Resultats precisió i exactitud del blanc 1 amb la Kinect V2 a 0,5 m.....	173
Taula A27. Resultats precisió i exactitud del blanc 1 amb la Kinect V2 a 1,0 m.....	174
Taula A28. Resultats precisió i exactitud del blanc 1 amb la Kinect V2 a 1,5 m.....	175
Taula A29. Resultats precisió i exactitud del blanc 1 amb la Kinect V2 a 2,0 m.....	176
Taula A30. Resultats precisió i exactitud del blanc 1 amb la Kinect V2 a 2,5 m.....	177

Taula A31. Resultats precisió i exactitud del blanc 2 amb la Kinect V2 a 0,5 m.....	178
Taula A32. Resultats precisió i exactitud del blanc 2 amb la Kinect V2 a 1,0 m.....	179
Taula A33. Resultats precisió i exactitud del blanc 2 amb la Kinect V2 a 1,5 m.....	180
Taula A34. Resultats precisió i exactitud del blanc 2 amb la Kinect V2 a 2,0 m.....	181
Taula A35. Resultats precisió i exactitud del blanc 2 amb la Kinect V2 a 2,5 m.....	182
Taula A36. Resultats de l'assaig d'exterior amb la Azure Kinect (NFOV Unbinned).....	183

Agraïments

Aquesta recerca ha estat parcialment finançada pel Ministeri de Ciència, Innovació i Universitats a través del projecte *PAGFRUIT* (ref. RTI2018-094222-B-I00): *Tecnologías de Agricultura de Precisión para optimizar el manejo del dosel foliar y la protección fitosanitaria sostenible en plantaciones frutales*. També agraeixo a la Universitat de Lleida per la concessió d'una Beca d'Introducció a la Recerca (convocatòria ordinària, curs 2019-2020), en el marc de la qual s'ha elaborat aquest estudi.

M'agradaria donar les gràcies a totes les persones que han fet possible la realització d'aquest Treball de Final de Màster.

Primerament agrair al director del treball Eduard Gregorio, no només per haver estat sempre disponible per resoldre'm dubtes, ajudar-me amb el que fos, facilitar-me informació i eines de treball o per interessar-se setmanalment per l'evolució del treball; sinó també per haver-me introduït en el món de la recerca, del qual no coneixia la seva profunditat i amb el que he viscut una experiència molt enriquidora.

També voldria donar les gràcies al estudiant de doctorat Jordi Gené per la seva aportació de idees en moments en que el treball estava encallat, així com per la seva ajuda i consells al realitzar els assajos recollits en aquest estudi. De la mateixa manera, vull agrair al estudiant de enginyeria informàtica Jaume Ortonoves per la seva ajuda en la realització i desenvolupament del programa dissenyat per la Azure Kinect.

Finalment, donar les gràcies a família i amics per el constant suport al llarg d'aquests mesos de treball.



FULL IDENTIFICATIU

Títol del estudi

Posta en marxa i avaluació experimental d'una càmera RGB-D: Microsoft Azure Kinect

Dades de l'autor

Nom i cognoms: Santiago Maestro Balaguer

DNI: 47981182-P

Adreça: C/ Teuleries nº 10 4^t 1^a, Lleida.

Telèfon: 973 22 17 67 ó 696 71 46 67

Adreça de correu electrònic: smaebal4@gmail.com

Dades del director del estudi

Nom i cognoms: Eduard Gregorio López

Departament: Departament d'Enginyeria Agroforestal

Adreça de correu electrònic: eduard.gregorio@udl.cat



Universitat de Lleida
Escola Politècnica Superior

Posta en marxa i avaluació experimental d'una càmera RGB-D:

Microsoft Azure Kinect

Santiago Maestro Balaguer



TERMINOLOGIA

Definicions i abreviacions

- Càmera RGB-D: Dispositiu equipat amb una càmera de color tradicional (RGB) i amb una càmera de profunditat (*Depth*), per poder captar imatges amb informació de color i de distància.
- Càmera estereoscòpica: Dispositiu per realitzar models 3D a partir de la mescla de imatges captades en el mateix instant des d'angles diferents.
- CMD (Consola De Comandaments): Finestra del sistema operatiu de Windows que permet executar codis per efectuar ajustos o execucions de aplicacions del propi ordinador.
- CMOS (*Complementary Metal–Oxide–Semiconductor*): És una tecnologia basada en el sistema fotoelèctric, per tant la llum captada per la càmera entra a través d'un filtre al sensor CMOS el qual està compostat per molts píxels. Segons la llum incident en el píxel es genera un voltatge que es transforma en una senyal corresponent a una combinació de colors RGB. Així cada píxel generarà un color corresponent al element real captat i es genera una imatge que és la combinació de tots els píxels amb el color que li pertoca.
- Firmware: És un bloc d'instruccions de programa per a propòsits específics, gravats en una memòria de tipus no volàtil, que estableix la lògica de més baix nivell que controla els circuits electrònics d'un dispositiu de qualsevol tipus.
- FPGA (*Field Programmable Gate Array*): Sistema que “imprimeix” un circuit digital de portes lògiques sobre el xip segons la configuració establerta per l'usuari. Es possible re-programar el circuit digital de manera que es “borra” el circuit existent i “s'imprimeix” un de nou.
- FPS (Fotogrames Per Segon): Unitat de mesura que indica la freqüència a la qual un reproductor o un enregistrator d'imatges genera els diferents fotogrames, rep aquest nom perquè determina el nombre d'imatges que apareixen en un sol segon.
- IMU (*Inertial Measurement Unit*): La unitat de mesurament inercial és un dispositiu electrònic que mesura i informa sobre la velocitat, orientació i forces gravitacionals d'un cos. Disposa de 6 graus de llibertat (3 per a un acceleròmetre i 3 per a un giroscopi) per a la orientació del sensor i per al seguiment espacial.
- Protecció IP: El grau de protecció IP (de l'anglès *Ingress Protection* o protecció d'entrada) és un marcat de protecció internacional segons l'estàndard IEC 60529 que classifica i avalua el

grau de protecció proveït contra la intrusió de cossos (parts del cos tals com mans i dits), pols, contacte accidental i aigua.

- RGB: Fa referència a la composició d'un color en termes de les intensitats dels colors primaris amb què es forma: del vermell (*red*), del verd (*green*) i del blau (*blue*).
- ToF (*Time of Flight*): És una tècnica utilitzada per estimar distàncies de cossos calculant el temps transcorregut entre l'emissió i la recepció d'un feix de llum infraroig.

Formats informàtics i de programació

- ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*): És un codi estàndard d'origen americà, per a l'intercanvi d'informació. L'ASCII és un joc de caràcters que assigna valors numèrics (del 0 al 127, 7 bits de longitud) a les lletres, xifres i signes de puntuació.
- BIN: Format propi en el que es guarden els projectes de CloudCompare.
- MKV (*Matroska*): Format que permet guardar una gran quantitat de vídeo, àudio o imatges. Està dissenyat amb la idea de ser un format universal per emmagatzemar arxius de caire audiovisual i multimèdia.
- OBJ: És un format per la definició de geometries en tres dimensions.
- PLY (*Polygon File Format*): És un format utilitzat en computació per guardar dades de captures tridimensionals. La informació que es guarda, descriu un objecte com una llista de polígons plans. Juntament a la informació de posició dels punts de la captura tridimensional, es pot assignar a cada punt una llarga llista de propietats com poden ser: color, transparència, textura, intensitat, etc. La manera de guardar la informació en aquest arxiu es pot triar entre codi ASCII o binari.



Universitat de Lleida
Escola Politècnica Superior

Posta en marxa i avaluació experimental d'una càmera RGB-D:

Microsoft Azure Kinect

Santiago Maestro Balaguer

1. INTRODUCCIÓ

1.1 Càmeres RGB-D

Guardar la informació tridimensional de la geometria dels objectes o els escenaris, ha començat a ser una pràctica cada cop més utilitzada en el flux de treball per a la documentació i anàlisi, com pot ser per exemple, en la realització d'estudis arqueològics, restauració, reconstrucció, conservació, així com també en un llarg número de indústries com l'automobilística o l'aeronàutica.

Els processos de digitalització han estat substancialment simplificats gràcies a diverses tècniques i tecnologies que permeten l'obtenció d'informació 3D (**Figura 1**). En el cas de grans espais o objectes, els escàners làser terrestres (TLS) són els preferits ja que la seva tecnologia permet captar una gran quantitat d'informació de manera precisa i ràpida. Per tal de reduir costos i poder treballar amb peces més petites, la tecnologia més utilitzada són les càmeres RGB-D. Tot i això, una tecnologia no és excloent de l'altra i es poden utilitzar de forma combinada per tal de cobrir les limitacions que pot presentar cadascuna utilitzada de forma individual, així com per obtenir modelats 3D més complets.

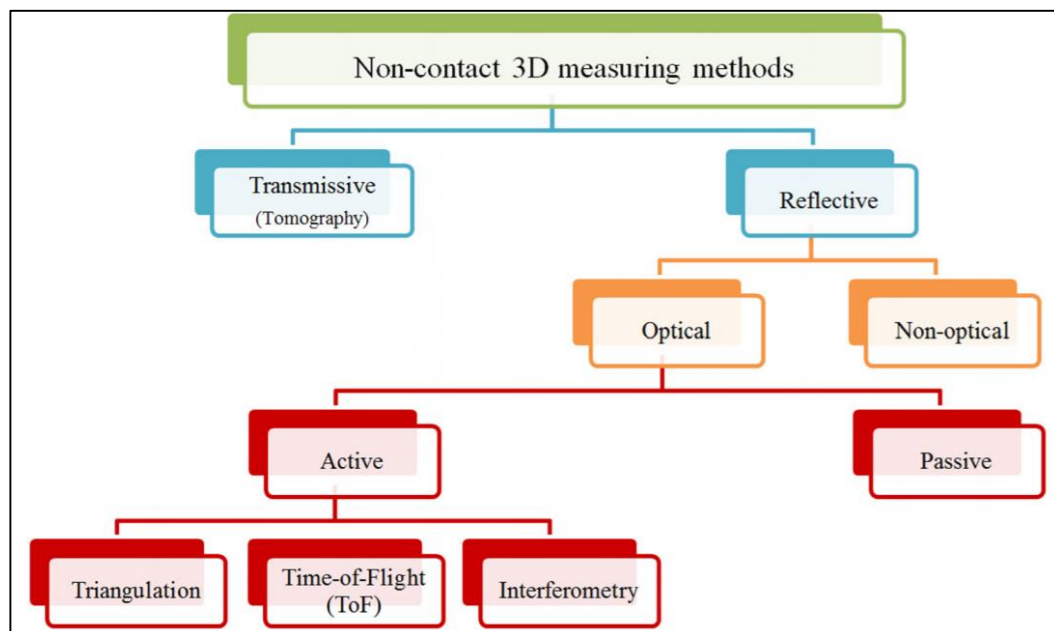


Figura 1 Esquema dels principals mètodes de mesurament de distància 3D a partir de detecció visual, és a dir, sense contacte amb el blanc que es vol mesurar (Font: Remote Sensing, Lachat 2015).

1.2 Camps d'aplicació de les càmeres RGB-D

Un ampli rang d'aplicacions poden ser explorades i desenvolupades amb les càmeres RGB-D. Els principals avantatges són el cost, el qual és baix en la majoria de casos, sobretot si es compara amb els escàners làser, així com també les dimensions i pes que fa que sigui un dispositiu fàcilment desplaçable i facilita la seva instal·lació en màquines de majors dimensions que necessitin d'aquesta tecnologia.

A més a més, la combinació de la informació 3D i de color juntament amb un bon rati de captura de fotogrames, fan que les càmeres RGB-D siguin un sensor atractiu per aplicacions relacionades amb el camps de la robòtica (*Figura 2*).

Altres camps d'aplicació poden ser els relacionats amb la geolocalització i realització de mapes tridimensionals d'entorns tant en interior com en exterior. També poden servir en aplicacions industrials com per exemple en la localització d'errors i desperfectes de components, o per realitzar deteccions en temps real en sistemes automatitzats. També s'han arribat a fer servir en camps de la medicina com pot ser en la realització de models tridimensionals d'òrgans, així com també han estat utilitzades en diversos estudis forenses per la documentació de l'escena en la que s'ha produït un crim.



Figura 2 Utilització d'una càmera 3D en un braç robòtic (Font: Computerra, 2018).

1.3 Càmeres estereoscòpiques i de *Time of Flight* (ToF)

Com s'ha comentat anteriorment, existeix un gran ventall de tecnologies que s'utilitzen en les càmeres 3D. En aquest apartat es vol descriure concretament les càmeres estereoscòpiques i ToF ja que són tecnologies utilitzades per les càmeres que s'han analitzat per la realització d'aquest estudi.

1.3.1 Càmeres estereoscòpiques

Les càmeres estereoscòpiques es basen en un principi molt simple, el de la visió humana. Els ulls humans estan separats entre ells aproximadament una distància de 65 mm, així que cada ull veu una imatge que encara que sigui igual té un angle diferent. El cervell és l'encarregat de barrejar les imatges captades per cada ull i donar l'efecte de relleu i profunditat.

Així doncs, aplicant això a les càmeres és possible aconseguir aquestes mateixes imatges des d'angles diferents i computar-les per obtenir el model 3D mitjançant diferents mètodes:

- Càmera especial amb dos objectiu: Sistema més universal i que permet capturar a partir de 1,5 m de distància a la càmera.
- Dues càmeres iguals i amb captura sincronitzada: Sistema centrat en la captura de paisatges a més de 3 m de distància a la càmera.
- Una càmera amb desplaçament manual per obtenir les dos imatges amb diferents angles: Sistema utilitzat per captures d'elements estàtics i paisatges llunyans.

Aquest sistema de funcionament que s'ha estat utilitzant ja des de bastants anys (**Figura 3**), combinats amb projectors de IR i altres components computacionals, ha donat lloc a que aquest tipus de càmeres s'hagin utilitzat en molts camps: topografia i estudi del terreny, estudi de planetes, medicina, enginyeria molecular, telecomunicacions, indústria...



Figura 3 Càmera estereoscòpica Kodak Stereo 35, fabricada al 1945 (Font: Cámaras 3D).

1.3.2 Càmeres ToF

Els sistemes ToF (*time-of-flight*) són dispositius òptics capaços de reconstruir una escena 3D a través del mesurament del temps que transcorre entre l'emissió d'un raig de llum i la seva captació (temps de vol) després de la seva reflexió en un blanc.

Les càmeres ToF són sistemes particulars ToF, capaços d'adquirir un mapa de distàncies a través de la difusió de la llum sobre tot l'escenari que contempla el dispositiu, i captant el retorn d'aquesta llum amb una matriu de sensors. Tant les càmeres com els sistemes ToF en general, són més ràpids i suposen un menor cost econòmic que un làser d'escaneig 3D, ja que en comptes de tenir un únic sensor que rota al llarg d'unes coordenades esfèriques com és el cas dels làsers, les càmeres ToF utilitzen una matriu de sensors capaços de reconstruir una escena 3D amb una freqüència de generació de fotogrames d'entre 30 Hz i 60 Hz.

Una càmera ToF està composta per un emissor d'infraroig (IR), una matriu de sensors IR i un sistema electrònic capaç de col·lectar les senyals reflectides i calcular la distància d'anada i tornada mitjançant el model matemàtic adequat. Existeixen dues tecnologies ToF principals en el mercat: la de ona polsada (*Pulsed Wave*) i la ona continua (*Continuous Wave*).

En la primera, el retard entre els polsos enviats i mesurats de IR, són mesurats amb un comptador sincronitzat amb la senyal emesa. El temps de retard resultant (t) es converteix en distància (d), tot seguint la expressió (1) (**Figura 4**).

$$d = c \cdot \frac{t}{2} \quad (1)$$

On c és la velocitat de la llum (en un medi que sigui aire).

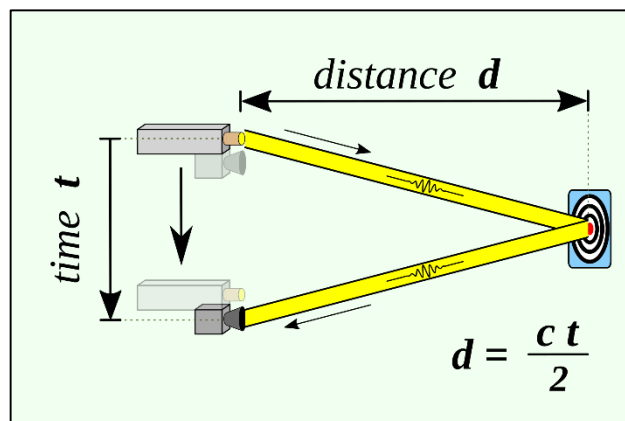


Figura 4 Esquematització del funcionament de un sistema ToF d'ona polsada (Font: Wikipedia, 2020).

Aquest procés requereix un recompte molt acurat, lo qual és difícil d'aconseguir en condicions normals, ja que hi ha molts factors externs com pot ser la mateixa temperatura de l'espai on es realitza una captura amb la càmera, que pot afectar al procés.

Per altra banda, la tecnologia d'ona continua, permet modular la llum emesa amb una ona sinusoidal, o el que acaba sent més freqüent, amb una ona quadrada amb freqüència (f) entre el rang de 10-100 MHz. En cada període, per tal d'obtenir desplaçament de la fase Φ , 4 mostres (desfasades 90°) de la llum reflectida i capturada pel sensor, són recollides. Així doncs, la distància (d) es pot calcular amb l'expressió (2).

$$d = \frac{c}{4 \cdot \pi \cdot f} \cdot \Phi \quad (2) \quad \text{on } \Phi = \arctan\left(\frac{Q3 - Q4}{Q1 - Q2}\right)$$

Cal aclarir de l'expressió (2), que Q1, Q2, Q3 i Q4 són les 4 mostres de la llum reflectida que s'utilitzen per al càlcul del desplaçament de la fase Φ (**Figura 5**).

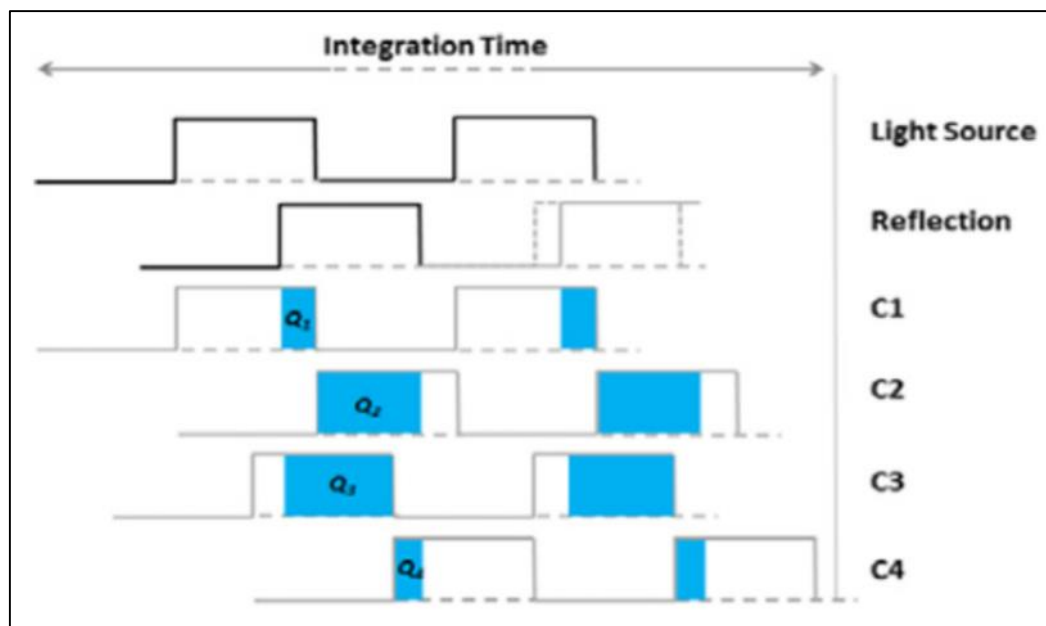


Figura 5 Esquematització de la captació de les 4 mostres Q1, Q2, Q3 i Q4 d'un sistema ToF d'ona continua
 (Font: Robotic and Autonomous Systems, Giancola 2016).

La naturalesa de la tecnologia d'ona continua basada en fases, implica l'aparició de la distància d'ambigüitat, la qual delimita l'abast màxim dels sistemes ToF, i que es defineix com es mostra en l'expressió (3).

$$d_{amb} = \frac{c}{2 \cdot f} \quad (3)$$

Els sistemes que utilitzen una única freqüència tenen majors problemes derivats d'aquesta distància d'ambigüitat. En canvi els sistemes ToF més avançats que disposen de multi-freqüències, poden controlar mitjanament aquesta distància d'ambigüitat sense perdre exactitud en les mesures de les distàncies.

Hi ha una llarga llista d'aplicacions d'aquest tipus de sistemes, però principalment s'utilitzen en:

- Sistemes per automòbils: La capacitat de detectar distàncies és molt útil en aquest camp. Existeixen sensors per detectar objectes pròxims per facilitar l'aparcament d'un vehicle, de detecció de vianants, de detecció d'objectes pròxims per evitar col·lisions...
- Robòtica: Gràcies a aquesta tecnologia es poden dissenyar robots amb capacitat d'actuar i decidir segons l'entorn, a partir de la creació de mapes de profunditat de l'escenari. Així doncs, si es detecta un obstacle en el moviment del robot es pot decidir que l'esquivi, així com si es reconèixer una persona o objecte, es pot interactuar amb aquest.
- Indústria: Son sistemes útils en molts processos de fabricació en cadena automatitzada, per exemple per detectar que un component es troba en la posició correcta en el seu procés de fabricació, o també es poden fer servir per detectar errors i desperfectes en peces.
- Oci i entreteniment: Alguns models de càmeres ToF que han tingut gran rellevància en l'estudi i desenvolupament d'aplicacions amb sistemes ToF, han sorgit com a complements de consoles de videojocs, per poder jugar en un entorn fictici, gràcies al reconeixement de la posició i distància del cos del jugador.

2. ANTECEDENTS

2.1 Motivacions

El present Treball Final de Màster s'ha desenvolupat en el marc d'una Beca d'Introducció a la Recerca (BIR) concedida per la Universitat de Lleida (UdL) i s'emmarca dins els àmbits de la robòtica agrícola i l'agricultura de precisió. En els darrers anys, el desenvolupament de càmeres RGB-D, que proporcionen núvols de punts 3D juntament amb informació de color, ha obert interessants possibilitats en l'àmbit de l'agricultura de precisió: caracterització de l'estructura geomètrica dels cultius, detecció de fruits, detecció de males herbes, etc.

L'ús d'aquests dispositius en l'agricultura pot facilitar el monitoratge i seguiment del creixement dels cultius i detectar condicions que els afectin positivament o negativament. Aquest estudi no pretén arribar a aquest nivell tan avançat de desenvolupament, però sí que busca obtenir uns primers resultats de la utilització d'una càmera nova en el mercat com és la Azure Kinect de Microsoft, i comparar-la amb els resultats obtinguts en estudis previs realitzats amb models de càmeres anteriors a aquest.

2.2 Estudis previs

2.2.1 *Estudis existents*

Com ja s'ha indicat, aquest estudi entra dintre del marc d'una Beca d'Introducció a la Recerca que s'ha fet amb col·laboració del Grup de Recerca en AgròTICa i Agricultura de Precisió (GRAP) de la UdL. És per això, que s'han pogut utilitzar com a punt de partida estudis semblants a aquest realitzats amb altres sensors, pel propi GRAP.

A part d'això, la posta en marxa i avaluació experimental de càmeres RGB-D és una pràctica que diferents grups de recerca arreu del món han realitzat al llarg del temps amb els diferents dispositius que han anat apareixent en el mercat, cosa que fa que hi hagi un gran nombre d'estudis i publicacions. Concretament, per aquest estudi s'han utilitzats consells, procediments, mètodes i tècniques dels següents estudis:

- Bueno, M; Díaz-Vilariño, L; Martínez-Sánchez, J; González-Jorge, H; Lorenzo, H. (2015). Metrological evaluation of KinectFusion and its comparison with Microsoft Kinect sensor. *Measurement*, 73, 137-145.
- Corti, A; Giancola, S; Mainetti, G; Sala, R. (2016). A metrological characterization of the Kinect V2 time-of-flight camera. *Robotic and Autonomous Systems*, 75, 584-594.
- DiFilippo, N; Jouaneh, M. (2015). Characterization of Different Microsoft Kinect Sensor Models. *Sensors Journal*, 15, 8.
- Gonzalez-Jorge, H; Rodríguez-Gonzálvez, P; Martínez-Sánchez, J; González-Aguilera, D; Arias, P; Gesto, M; Díaz-Vilariño, L. (2015). Metrological comparison between Kinect I and Kinect II sensors. *Measurement*, 70, 21-26.
- Khoshelham, K; Oude Elberink, S. (2012). Accuracy and Resolution of Kinect Depth Data for Indoor Mapping Applications. *Sensors*, 12, 1437-1454.
- Lachat, E; Macher, H; Landes, T; Grussenmeyer, P. (2015). Assessment and Calibration of a RGB-D Camera (Kinect V2 Sensor) Towards a Potential Use for Close-Range 3D Modelling. *Remote sensing*, 7, 13070-13097.
- Leo, M; Natale, A; Del-Coco, M; Carcagnì, P; Distantè, C. (2017). Robust Estimation of Object Dimensions and External Defect Detection with a Low-Cost Sensor. *Springer Science*, 36, 17.
- Sarbolandi, H; Lefloch, D; Kolb, A. (2015). Kinect range sensing: Structures-light versus Time-of-Flight Kinect. *Computer Vision and Image Understanding*, 139, 1-20.

2.2.2 Selecció de la càmera

El primer pas d'aquest treball va consistir en analitzar els models Ensenso XR de IDS, la Azure Kinect de Microsoft i la Intel RealSense D435 per decidir amb quin model de càmera RGB-D es realitzaria l'estudi. Es va decidir estudiar aquests models actuals per veure si s'obtenien millors resultats que amb la Kinect V2 de Microsoft, sensor que ja havia estat utilitzat anteriorment pel grup de recerca, per a la caracterització de cultius.

Així doncs, en aquest apartat es recullen les característiques de les càmeres analitzades, la comparativa entre les tres i la justificació de perquè es va acabar triant la Azure Kinect.

Ensenso XR30 i XR36 de IDS

La sèrie Ensenso XR (**Figura 6**) combina una estructura modular i flexible amb la capacitat de processar les dades de les imatges que captura de forma autònoma, de manera que les dades 3D estan disponibles directament en la càmera.



Figura 6 Configuració d'una càmera de la sèrie Ensenso XR amb un projector central i dos càmeres als laterals (Font: Ensenso).

Les característiques tècniques de la sèrie XR són les següents:

- La càmera realitza la captació 3D mitjançant una tecnologia estereoscòpica, tot i que també disposen de models amb tecnologia de temps de vol.
- Consta d'un projector central de 100 W LED (1000 W convencionals) i dos càmeres uEye als dos laterals del projector, que es poden allunyar o apropar del mateix mitjançant una corredora.

- Disposa de processament intern de la informació 3D captada, per tant no es càrrega tant temps de càlcul en un ordinador, i aquest no necessita que sigui molt potent per treballar amb el software.
- Transmissió de la informació entre la càmera i un ordinador, per WI-FI o per cable.
- Protecció IP que permet treballar a l'interior i a l'exterior:

IP65: Protecció completa contra pols i rajos d'aigua.

IP67: Protecció completa contra pols i protecció a la immersió completa sota l'aigua.

- Processament de la informació 3D en la pròpia càmera mitjançant FPGA (*Field Programmable Gate Array*).
- La única diferència entre el model XR30 i XR36 és la tecnologia FlexView. Aquesta tecnologia permet l'adquisició precisa i ràpida de detalls de imatge en estàtic. Això fa que el model XR36, que és el que disposa d'aquesta tecnologia, sigui millor per escenes estàtiques, mentre que el XR30 és millor per captures ràpides o objectes en moviment. En la **Figura 7** es mostra la comparativa entre els dos models que s'ha extret de la web del fabricant.

Serie	Interfaz	Grado de protección IP	Flex View ⓘ	Escenas dinámicas	Internal Processing
<input type="checkbox"/> N10	USB2	IP30	✗	✓	✗
<input type="checkbox"/> N30	GigE	IP65/67	✗	✓	✗
<input type="checkbox"/> N35	GigE	IP65/67	✓	(✓) ⓘ	✗
<input type="checkbox"/> X30	GigE		✗	✓	✗
<input type="checkbox"/> X36	GigE		✓	✗	✗
<input checked="" type="checkbox"/> XR30	GigE		✗	✓	✓
<input checked="" type="checkbox"/> XR36	GigE		✓	✗	✓
Sensores (serie XR)		Interfaz	Grado de protección IP		Resolución
<input checked="" type="checkbox"/> GV-5040FA	GigE	IP65/67		1.6 MP	
Flash					
<input checked="" type="checkbox"/> Azul	Iluminación en el espectro visible, 465 nm				

Figura 7 Comparativa dels models XR30 i XR36 de la sèrie Ensensio (Font: Ensensio).

- S'utilitza la tecnologia de sensors CMOS per la captació de la imatge.
- Com s'ha dit, a part del projector central s'utilitzen dos càmeres uEye als laterals. De manera general s'assegura que aquestes càmeres poden detectar objectes a distàncies de fins a 5 metres. A més també disposen de sensors Sony amb resolució de 1,6 MP (a mig camí entre el HD+ que són 1,44 MP i el Full HD que són 2,0736 MP).

- Tots els punts anteriors són una idea general que dona el fabricant de com pot ser una càmera estàndard d'aqueta sèrie de Ensenso, i es que el fabricant permet a l'usuari dissenyar la configuració de components que vol per a la seva càmera, per tant hi han moltes possibilitats i la informació presentada anteriorment és purament orientativa.
- Hi ha diverses càmeres uEye que es poden acoblar al projector central, segons el tipus de ús que hagin de tenir. A continuació es pot veure en detall cadascun dels models de càmera possibles, això sí, totes coincideixen en que han de ser de interfície GigE i sense USB ja que aquestes últimes són per a altres models de Ensenso:
 - GigE uEye FA: Pensada per a la automatització industrial.
 - GigE uEye LE: Amb placa CMOS compacta amb excel·lent qualitat de imatge i diverses funcions addicionals.
 - GigE uEye SE: Càmera tot-terreny, amb una ampla gama de sensors.
 - GigE uEye CP.
 - GigE uEye RE: Càmera ultra-resistent.
- A més de seleccionar una càmera entre el ampli catàleg que tenen, també és necessari seleccionar un objectiu dels quals també hi ha una llarga llista amb diferents característiques segons el rang d'actuació que es vulgui de la càmera.
- A la web del fabricant també es disposa de una calculadora de FPS per conèixer si amb la configuració establerta per l'usuari s'arriba als fotogrames que aquet desitja.
- Disposa del software Ensenso SDK per desenvolupar aplicacions amb les càmeres.
- D'acord al fabricant, la configuració que es podria necessitar d'algun d'aquests dos models per aquest estudi suposaria un cost de entre 14.000 € i 19.000 €.

Azure Kinect

El nou model de Kinect (**Figura 8**) presenta un kit de desenvolupament amb sensors de intel·ligència artificial avançats per elaborar sofisticats models de veu i visió artificials. Està dissenyat per oferir versatilitat, combinant un sensor de profunditat avançat amb una matriu de micròfons especials, una càmera de vídeo i un sensor d'orientació amb diferents modes i opcions.



Figura 8 Azure Kinect de Microsoft (Font: Microsoft).

Les característiques i limitacions d'aquest model són les següents:

- S'ha de fer servir amb una temperatura ambient de entre 10 °C i 25 °C.
- Segons el fabricant pot funcionar en exteriors sense problemes.
- El sensor de profunditat utilitza la tecnologia Time of Flight.
- Requisits del sistema:
 - PC amb Windows 10 o Ubuntu 18.04 LTS.
 - Processador Intel Core i3 de 7^a generació (Dual Core a 2,7 GHz).
 - Port USB 3.0.
 - 4 GB de RAM.
 - Per a seguiment del cos o altres situacions pot ser necessari un PC més avançat.
- Disposa de software gratuït per al visionat de la càmera RGB, la càmera de profunditat i el infraroig, així com també permet fer lectures de distància i veure en una gràfica les lectures de l'acceleròmetre i giroscopi que incorpora.
- Cost entre 370 € i 400 €.

- Els components de la càmera es mostren a continuació en la **Figura 9**.

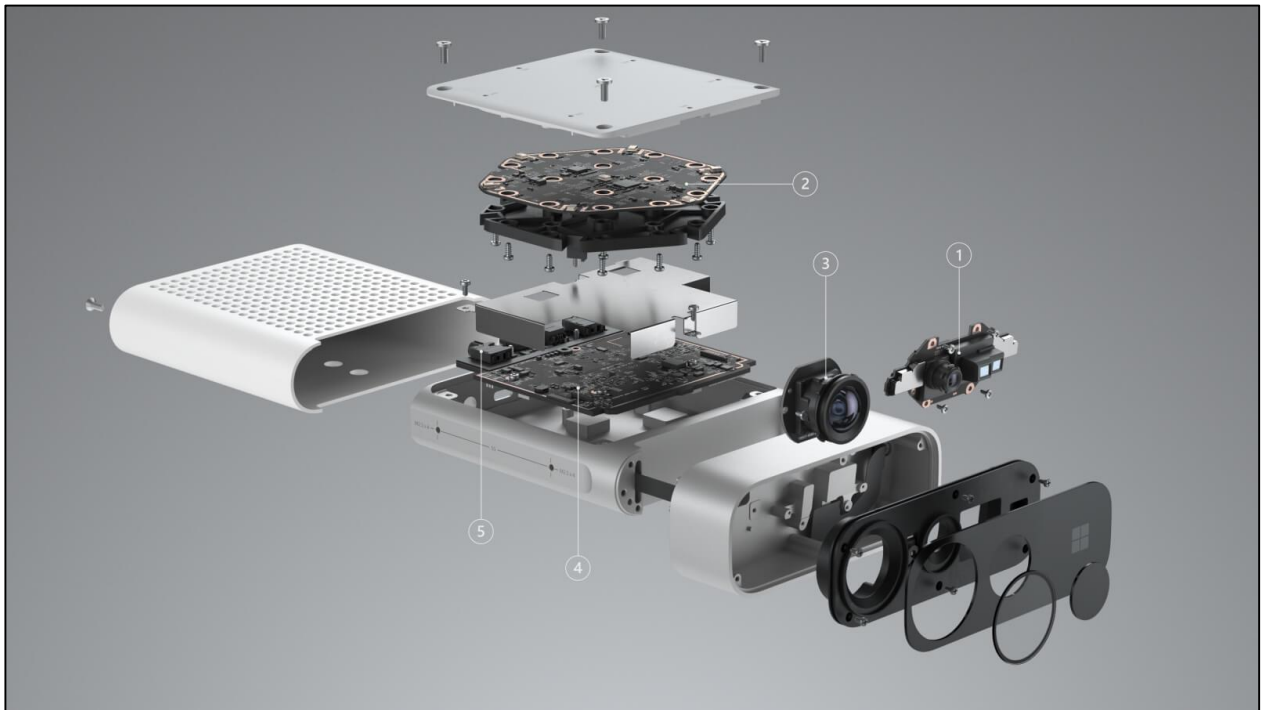


Figura 9 Esquema dels elements que conformen la Azure Kinect (Font: Microsoft).

- 1) Sensor de profunditat de 1MP: Està entre resolució de 720p (HD amb 0,9216 MP) i 768p (HD+ amb 1,0469088 MP). El sensor disposa d'opcions per augmentar o disminuir el camp de visió, per adaptar-se al tipus d'aplicació al que es destina la càmera.
- 2) Matriu de 7 micròfons: Grup de micròfons que operen de forma conjunta. A cada micròfon li arriba el so en instants diferents, d'aquesta manera es pot calcular d'on ve la font de so tenint en compte el desfasament entre les diferents senyals que capten els micròfons.
- 3) Càmera de vídeo RGB de 12 MP: Resolució superior a 2160p (4K UHD amb 8,2944 MP). Disposa d'una escala de colors que combina amb el sensor de profunditat, per diferenciar els objectes propers dels llunyans. La càmera fa servir un sensor CMOS.
- 4) Acceleròmetre i giroscopi (IMU): Permet mesurar l'acceleració i les forces induïdes per la gravetat, es a dir permet detectar el moviment i el gir de la càmera (molt semblant a l'acceleròmetre del telèfon mòbil per fer fotos en vertical o horitzontal, i també en consoles on es juga amb el moviment del comandament com pot ser la Wii de la companyia Nintendo).
- 5) Connexions que permeten sincronitzar el dispositiu amb els sensors d'altres dispositius Kinect, de forma simultània.

Intel RealSense D435

El model Intel RealSense D435 (**Figura 10**) és una càmera estereoscòpica que ofereix detecció de profunditat de qualitat per a una gran varietat d'aplicacions. El seu ampli camp de visió és perfecte per aplicacions com la robòtica o la realitat augmentada, on veure la major quantitat de la escena és de vital importància.



Figura 10 Intel RealSense D435 (Font: Intel).

Les característiques d'aquest model són:

- Es pot utilitzar tant en interior com en exterior.
- Rang màxim aproximadament de 10 m, tot i que l'exactitud dependrà del calibratge, el tipus d'escena a capturar i les condicions lumíniques.
- Obturador global de dimensions de píxel de $3\mu\text{m} \times 3\mu\text{m}$.
- Utilitza la tecnologia estereoscòpica combinada amb l'emissió de rajos IR, coneguda amb el nom de estèreo IR actiu.
- Distància mínima per captació de profunditat de 0,105 m.
- Camp de visió (*Field of View*) de la càmera de profunditat de $87^\circ \pm 3^\circ \times 58^\circ \pm 1^\circ \times 95^\circ \pm 3^\circ$.
- Resolució de la càmera de profunditat de 1280×720 i amb una freqüència de captura de fins a 90 fps.
- Resolució de la càmera RGB de 1920×1080 amb una freqüència de captura de 30 fps.
- Camp de visió (*Field of View*) de la càmera RGB de $69.4^\circ \times 42.5^\circ \times 77^\circ (\pm 3^\circ)$
- Dimensions totals de la càmera de 90 mm x 25 mm x 25 mm (Llarg x Ample x Alt). No ocupa gaire espai, cosa que fa que es pugui equipar en màquines amb facilitat.
- Disposa d'una eina de desenvolupament de programes per a la càmera que rep el nom de Intel RealSense SDK 2.0.
- Cost entre 200 € i 300 €.

- La càmera disposa del dos objectius de profunditat situats a cada extrem de la cara frontal, entre aquests dos es troba un projector de IR i la càmera RGB es troba a continuació de l'objectiu de profunditat esquerra. Aquesta disposició es pot veure en la **Figura 11**.

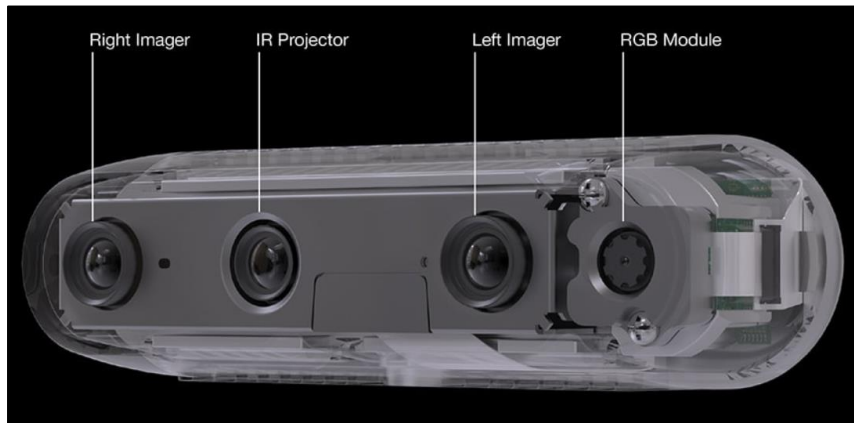


Figura 11 Vista en detall de la disposició dels components de captació d'imatge de la Intel RealSense D435 (Font: Intel).

La càmera esta formada per una sèrie de components, amb un encapsulat d'alumini que protegeix els objectius i els components electrònics de l'interior. A més a més, aquesta càmera no es necessita d'una font de potència independent, sinó que únicament necessita connectar-se a un ordinador a través del seu cable USB-C. En la **Figura 12** es poden veure amb més detalls els diferents components del dispositiu.

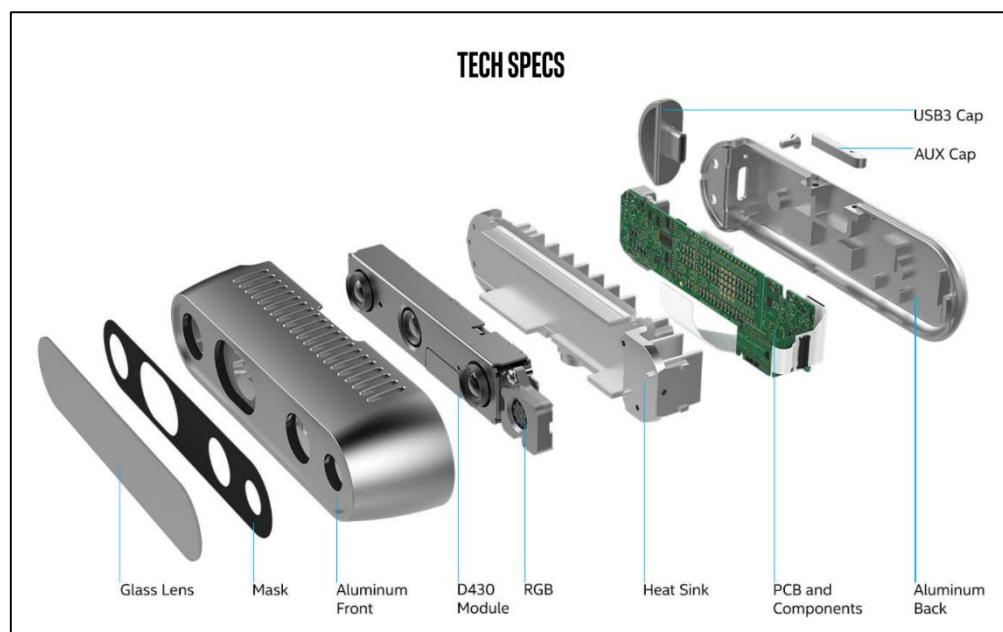


Figura 12 Esquema dels elements que conformen la Intel RealSense D435 (Font: Intel).

Justificació del model seleccionat

Abans d'exposar els diferents motius que justifiquin la selecció feta, és interessant veure la **Taula 1** que conté un resum i una comparativa general dels trets principals que es busquen en la càmera a seleccionar, i així reforçar la justificació feta.

Taula 1. Resum i comparativa dels paràmetres de interès de les càmeres analitzades.

Paràmetre / Càmera	Ensenso XR	Azure Kinect	Intel RealSense D435
Tecnologia	Estereoscòpica	ToF	Estèreo IR actiu
Resolució màxima RGB	4096 x 3000 *	4096 x 3072	1920 x 1080
Resolució màxima Depth camera	1920 x 1080 **	1024 x 1024	1280 x 720
Abast	***	0,5 m – 5,46 m	0,105 m – 10 m
Software per desenvolupament d'aplicacions	✓	✓	✓
Processament intern	✓	✗	✗
Facilitat d'ús	✗	✓	✓
IMU	✗	✓	✗
Cost	14.000 € - 19.000 €	370 € - 400 €	200 € - 300 €

*La resolució de les sèries Ensenso XR depèn del tipus de càmera RGB que es seleccioni en la configuració, per tant no té una resolució fixa, i el valor que es mostra correspon a la resolució màxima de les càmeres RGB seleccionables.

**Les càmeres de profunditat dels models Ensenso XR es poden triar entre un ampli catàleg i la resolució dependrà de la configuració, encara així el valor que es mostra és el màxim que s'ha trobat.

***És impossible definir un únic abast per als models Ensenso, segons la càmera de profunditat triada es tenen diferents rangs d'actuació: curta distància, mitja distància o llarga distància.

Com s'ha dit anteriorment, el model que s'ha acabat seleccionant és la Azure Kinect de Microsoft després de valorar les següent conclusions a les que s'ha arribat de l'anàlisi de cada càmera:

- En quant a la tecnologia, d'estudi anteriors fets amb la Kinect V2 que, igual que la Azure, utilitza el sistema ToF es sap que de cara a la caracterització de cultius (que és un dels projectes a futur per al que es vol fer servir la càmera seleccionada) es tenen millors resultats que no pas amb la Intel (de la qual ja es disposava per part de grup de recerca).
- En quant a la resolució de la càmera RGB i de profunditat sembla clar que la Azure i els models Ensenso són superiors a la Intel. Això sí, cal aclarir que Ensenso només pot tenir aquestes resolucions triant la configuració adequada (cosa que pot implicar augments de cost), en canvi la Azure ja disposa d'aquesta resolució per defecte en els seus modes.
- En quan a l'abast dels models Ensenso no estan molt clars, de nou torna a dependre de la configuració que es vulgui o es pugui triar. D'altra banda la Azure sí que es queda en un rang de distàncies més limitat que no pas la Intel, encara així, per aquest estudi i posteriors que es vulguin fer, es creu que la Azure ja disposa d'un abast més que suficient.
- Totes les càmeres tenen software de desenvolupament d'aplicacions que es gratuït, de manera que es disposen de totes les funcions i llibreries, per poder programar cada càmera per a l'ús que es vulgui donar.
- Tot i disposar de software per desenvolupar aplicacions específiques, els models Ensenso disposen de processament intern de la informació 3D captada, d'aquesta forma es possible obtenir els núvols de punts directament de la càmera. La Azure Kinect i la Intel no poden processar directament els núvols de punts, sinó que necessiten tractar les dades a partir d'un programa que s'ha de dissenyar específicament per cada càmera. Aquest és un gran avantatge dels models Ensenso sobre les altres càmeres ja que fa que la càrrega de treball del tractament de les dades que s'hagi de fer en un ordinador extern, sigui molt inferior al que s'ha de fer amb les altres càmeres, però a la vegada implica un increment considerable del cost.
- Pel que fa a facilitat d'ús, els models Ensenso són complexes, ja que es necessita d'un estudi profund de la configuració adequada per a que el dispositiu funcioni correctament i serveixi per les aplicacions per les que s'ha elegit. La Intel és la que té el funcionament més senzill ja que és una unitat compacta que, a més, no necessita de fonts de potència externa, sinó que únicament s'ha de connectar a un ordinador. La Azure està a mig camí entre les dos, ja que també es tracta d'una unitat compacta, però degut a la tecnologia ToF que utilitza, requereix d'una font de potència externa a part de la seva connexió a un ordinador.

- La Azure disposa d'un sistema IMU que pot ser útil per la correcció de captures amb la màquina en moviment, en canvi les altres dos càmeres no disposen d'aquest sistema. Cal remarcar però que Intel ha llançat al mercat un nou model (D435i) que disposa de IMU.
- Un dels motius principals per descartar els models de Ensenso ha sigut el cost. Els models de Ensenso tenen un preu molt elevat per al objectiu al que es vol arribar en aquest estudi, mentre que la Azure i la Intel tenen un preu més assequible.
- El fet d'acabar triant una de les configuracions de Ensenso tampoc garantia que acabés sent la òptima per aquest estudi, ja que aquests models estan més pensats per a la automatització industrial o per activitats en un recinte tancat.
- El model de Microsoft és més un tot-terreny, ja que tot i que està pensada principalment per fer-la servir en interiors, el equip tècnic de la empresa amb qui es va contactar, va assegurar que no hi hauria problemes de portar-la al exterior. A més, es tenia la Kinect V2 de referència que tot hi ser un model també pensat per interiors, s'havia fet servir prèviament en exteriors sense grans inconvenients.

3. OBJECTE

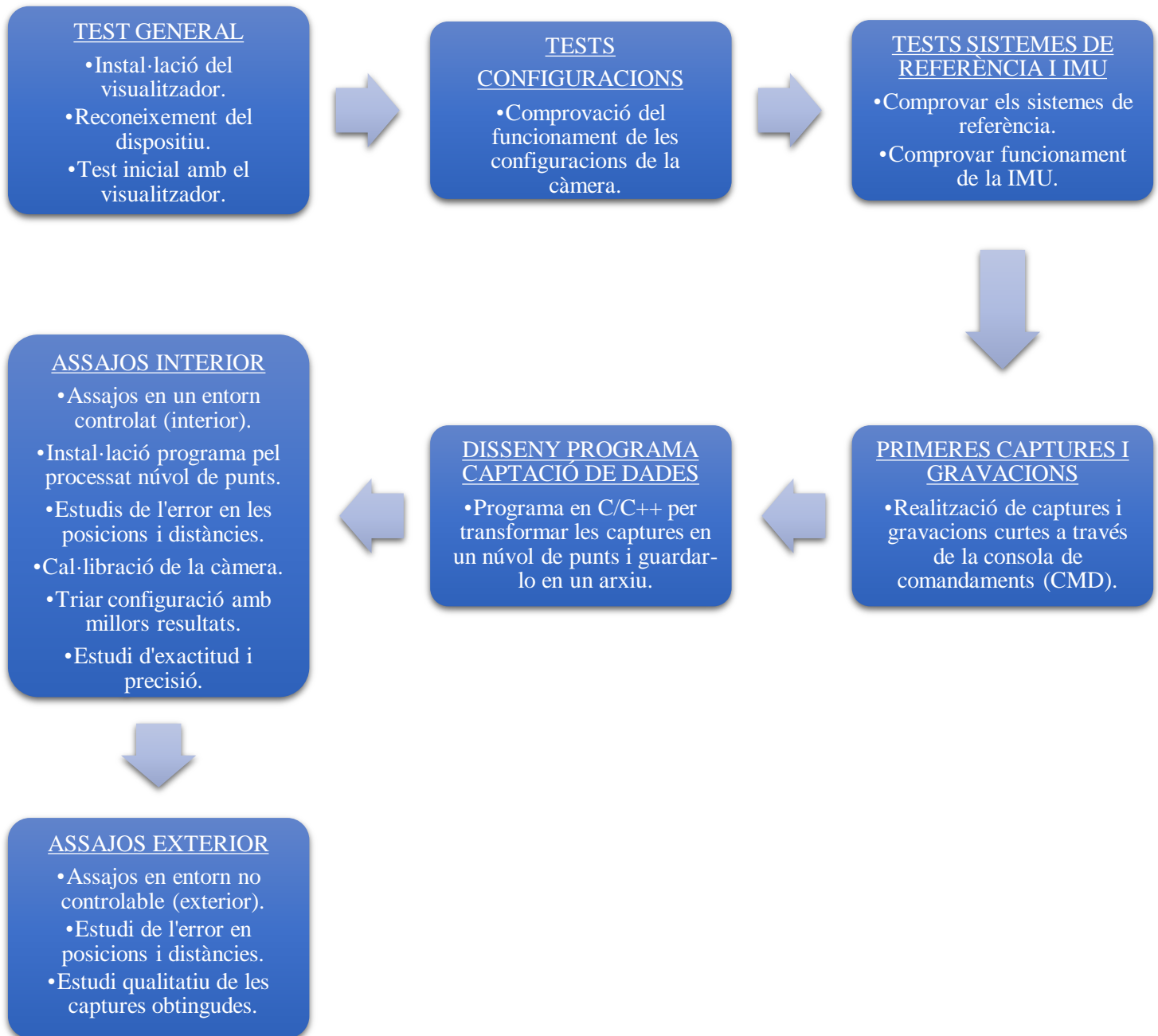
L'objectiu de l'estudi és conèixer quin és el mercat actual de sensors RGB-D i, a partir d'aquí, posar a punt un sensor RGB-D per la seva futura aplicació en l'àmbit agronòmic. La posta a punt inclou la realització d'assajos en condicions controlades i de camp, així com el desenvolupament i adequació d'un software d'adquisició de dades.

L'abast d'aquest estudi és el següent:

- Estudi previ dels tipus de càmeres RGB-D:
 - Principis de funcionament.
 - Tecnologies utilitzades.
 - Camps d'aplicació.
- Prèviament es va realitzar una comparativa entre els dos models de Ensenso XR, la Azure Kinect i la Intel RealSense D435 per determinar quina seria la càmera que s'adquiriria per iniciar el estudi. Per tant, en aquest informe també s'inclou l'estudi que s'ha fet dels diferents models i les conclusions que es van acabar prenent per acabar triant la Azure Kinect.
- Procediment per la inicialització de la càmera i comprovació del correcte funcionament de tots els seus sensors i components.
- Disseny d'un software d'adquisició de dades.
- Tractament de les dades obtingudes en softwares de visionat i amidament de núvols de punts.
- Assajos en zones controlades (interiors) i també al exterior.
- Es buscarà, sempre que sigui possible, oferir de cada assaig, una comparativa entre la Azure Kinect i la Kinect V2 (model anterior), ja que aquesta última va ser utilitzada anteriorment pel grup de recerca en estudis previs, per tant es important veure quins avantatges i inconvenients pot suposar utilitzar la Azure Kinect enfront del seu model anterior.
- En aquest estudi no es realitzaran gravacions amb la càmera sinó que únicament es centrarà en captures i en el tractament dels resultats d'aquestes.

4. ESTRUCTURA DE L'ESTUDI

En aquest apartat es recull una vista general dels passos que s'han seguit per posar a punt la càmera per a que sigui utilitzada per fer captures i obtenir un núvol de punts sobre el que prendre mesures.



En els següents apartats d'aquest estudi es recull una explicació més àmplia de cadascun dels processos que es mostren en l'esquema i les eines i materials que s'han necessitat per dur-lo a terme.

5. EINES UTILITZADES

5.1 Eines Hardware

Les eines hardware utilitzades en aquest estudi són principalment dos sensors: la Azure Kinect i la Kinect V2, les dos del fabricant Microsoft. Les característiques de la Azure Kinect ja s'han presentat anteriorment (Secció 2.2.2) a l'hora de justificar la selecció i adquisició d'aquesta càmera per aquest estudi, per tant només queda parlar de la Kinect V2 (*Figura 13*).



Figura 13 Microsoft Kinect V2 (Font: Microsoft).

Inicialment els sistemes ToF van repercutir especialment en la indústria automobilística, ja que es poden utilitzar en diferents aplicacions com per exemple facilitar les maniobres del conductor o fins i tot, que sigui possible que la conducció sigui automatitzada.

Tot i això, les càmeres de profunditat 3D han tingut el major èxit en el camp dels videojocs i l'entreteniment. La segona versió de la Microsoft Kinect, la Kinect V2, és un accessori de la consola Xbox One, que reconstrueix una escena i identifica la posició del cos del jugador, per tal de que aquest pugui interactuar amb un espai que representa una realitat virtual. A part d'això, aquest dispositiu és un dels més eficients i de menor cost, en el mercat de les càmeres ToF. A més, disposar d'un software obert ha fet que la càmera sigui compatible amb molts sistemes operatius i amb moltes llibreries de generació de núvol de punts, de manera que molts usuaris s'han llançat a la creació de les seves aplicacions utilitzant aquesta càmera.

La Kinect V2 disposa de les següents característiques tècniques:

- Disposa d'una càmera ToF d'ona contínua amb una resolució de 512 x 424 píxels, la qual està situada tal i com es mostra en la **Figura 14**. És important conèixer la seva posició ja que tindrà efecte en les posicions dels punts dintre del núvol, i el valor de les coordenades de cada punt.
- Compta amb una càmera RGB amb una resolució de 1920 x 1080 píxels.
- Compta amb 3 projectors IR per realitzar la il·luminació amb llum infraroja de l'escena observada.
- Per la captació d'àudio disposa d'una bateria de 4 micròfons.
- També compta amb una sèrie de components electrònics per l'elaboració i el tractament del senyal.
- La càmera és capaç de realitzar adquisicions a 30 fps.
- El camp d'operació és definit pel rang de profunditat de 0,5 m a 4,5 m i amb un camp de visió de 70° en horitzontal i 60° en vertical.
- El kit de desenvolupament de software (SDK), proveït per Microsoft, dona la possibilitat de programar el software de control de la càmera i, en particular, adquirir i guardar les dades de profunditat, de IR, de color i de àudio. A més, el SDK també disposa d'una funció a partir de la qual generar un núvol de punts a partir de la posició dels píxels llegida per la càmera de profunditat.

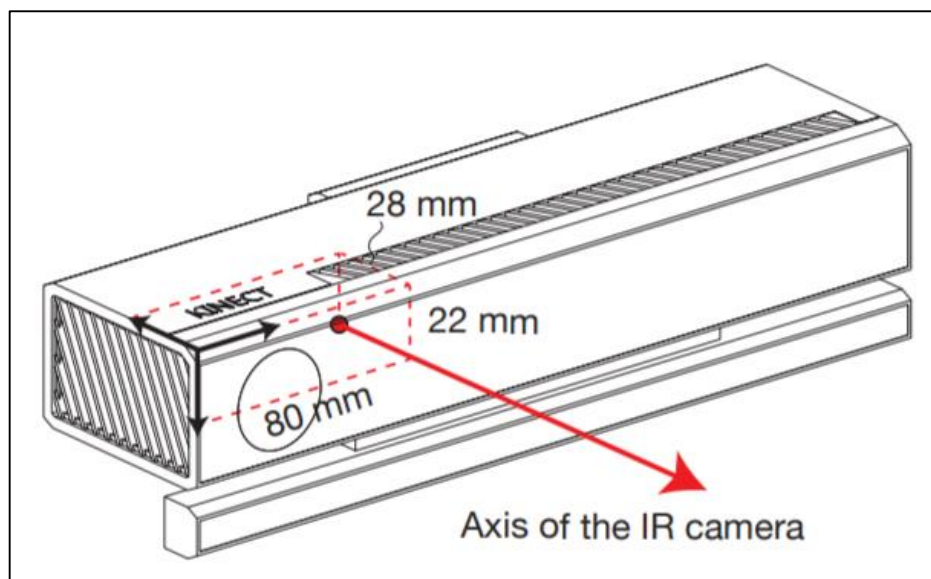


Figura 14 Esquema de la posició de la càmera de profunditat de la Kinect V2
(Font: Technische Universität München, Germany).

Hi ha tres fonts diferents que generen sortides de informació que provenen de les dos lents de la Kinect V2 (**Figura 15**): la informació de infraroig i el mapa de profunditats, obtinguda de la il·luminació infraroja amb el projector IR, i recollida per la lent amb el sensor IR (imatges 2D de 16 bits on la informació es guarda per cada píxel), i les imatges a color d'alta resolució recollides per la càmera RGB. El núvol de punts es calcula gracies al mapa de profunditats, ja que conté la informació de distàncies i posicions. De les dades de profunditat guardades, es poden extreure coordenades 3D a partir de les dades 2D mitjançant les funcions del SDK donant com a resultat una llista de coordenades (X, Y, Z) que es poden mostrar com un núvol de punts.

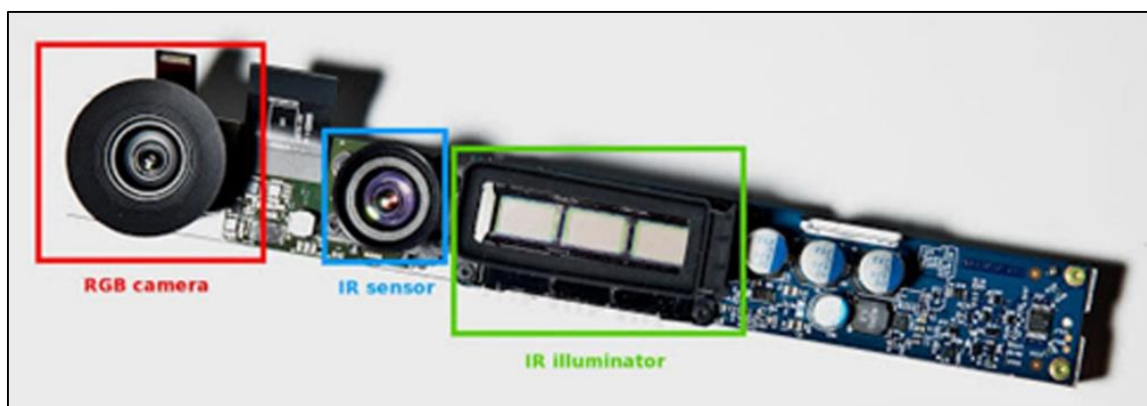


Figura 15 Vista en detall dels components de captura de la Kinect V2 (Font: Measurement, González 2015).

5.2 Eines Software

5.1.1 *Azure Kinect Viewer v1.3.0*

Software gratuït de Microsoft per visualitzar totes les fonts de informació de la Azure Kinect. Les principals funcions del programa són:

- Verificar que els sensors funcionen correctament.
- Ajudar en les tasques de posicionament de la càmera respecte al blanc que es vol enfocar.
- Experimentar amb les diferents configuracions i modes disponibles de la càmera de vídeo i de profunditat.
- Reconèixer el dispositius connectats a l'ordinador i la seva configuració.
- Visionar gravacions fetes anteriorment amb la càmera.

En aquest estudi s'ha utilitzat principalment per:

- Comprovar que el dispositiu sigui reconegut per l'ordinador.
- Comprovar que els sensors funcionin.
- Comprovar que els sistemes de referència que disposa el dispositiu per cada càmera i per la IMU corresponen als que facilita el fabricant.
- Tenir una idea general de com funciona cadascun dels modes de profunditat i color a l'hora de fer les captures dels assajos.
- Comparar els resultats dels assajos que s'han obtingut del programa dissenyat, i veure que són coherents amb el visualitzador.
- Centrar el blanc que es vol capturar en els assajos.
- Reproduir vídeos realitzats amb la càmera RGB.
- Detectar problemes en el funcionament d'algun dels elements o possibles desconexions del dispositiu.

A continuació es fa una explicació dels elements que es mostren en la interfície d'aquest programa (**Figura 16**):

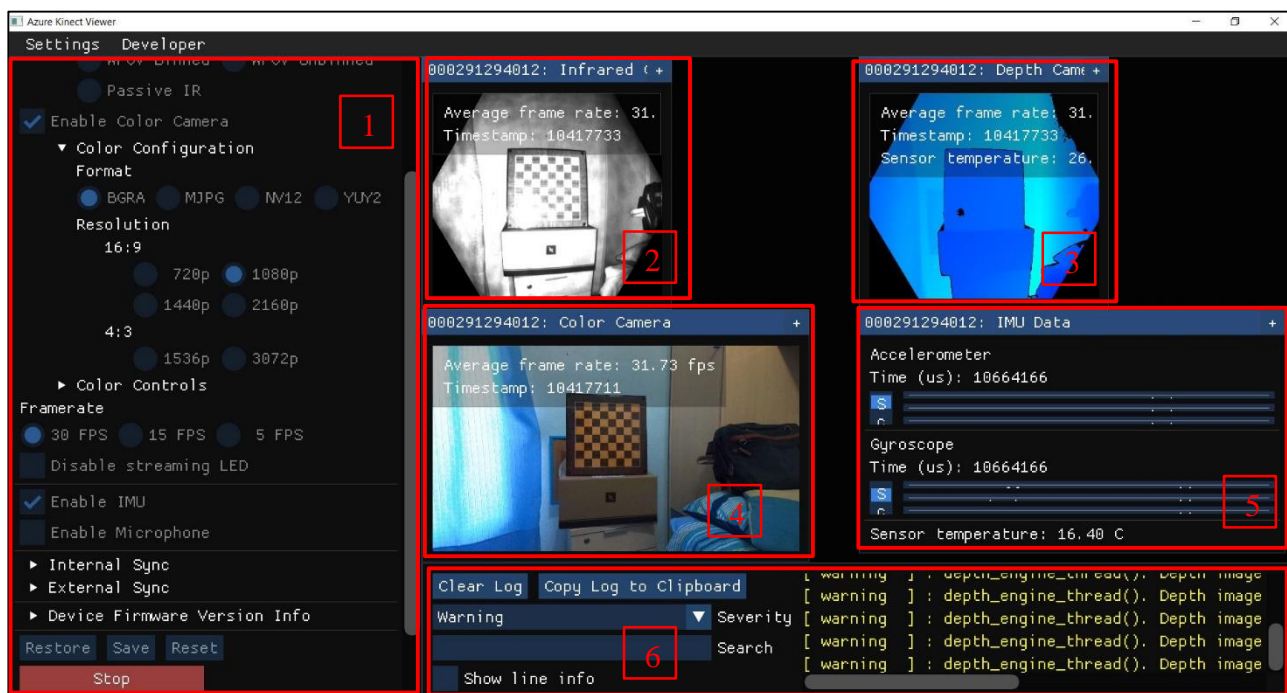


Figura 16 Interfície del programa "Azure Kinect Viewer v1.3.0".

- 1) Finestra de configuració: Permet establir quines càmeres ficar en funcionament (color i profunditat), així com el mode de profunditat i la resolució de la càmera de color. També es poden indicar la quantitat de FPS per visualitzar com es gravaria un vídeo amb un cert nombre de FPS. També es poden modificar una llarga llista de paràmetres de la càmera de color, però això ja és per situacions més concretes, en aquest estudi s'han utilitzat els valors establerts per defecte del dispositiu (**Figura 17**).

És possible activar i desactivar la IMU i la bateria de micròfons i accedir al tipus de sincronització entre les càmeres (sincronització interna) i del dispositiu amb altres dispositius en cas de voler treballar amb més de una Azure Kinect (sincronització externa).

Per últim, també és possible consultar la versió de Firmware que es té als diferents components del dispositiu i confirmar que es disposa de la última versió o si és necessari actualitzar-lo.



Figura 17 Vista en detall dels menús que ofereix la finestra de configuració del visualitzador (Font: Microsoft).

- 2) Visualitzador IR: Finestra que permet veure en una escala de grisos el senyal d'infraroig reflectit pels elements que s'estan enfocant amb la càmera de profunditat. En la finestra d'aquest visualitzador també es mostra una mitja dels FPS i el temps que porta en funcionament la càmera de profunditat.
- 3) Visualitzador de profunditat: Finestra que fa una representació amb una escala de colors a partir de la informació de profunditat que rep. Els colors més freds corresponent a elements que estan més a prop de la càmera mentre que els càlids corresponent a elements més llunyans. Igual que amb el visualitzador de IR també es dona una mitja dels FPS i el temps de funcionament de la càmera de profunditat. A més, és possible passar el ratolí per sobre del

que s'està capturant i obtenir informació de la distància a la que es troba el píxel sobre el que està el cursor del ratolí.

- 4) Visualitzador càmera de color: Es pot veure el que està enfocant la càmera de color (RGB) com si es tractés d'una càmera comú. Igual que amb la càmera de profunditat, aquí també es dona informació de la mitja de FPS que recull la càmera, i el temps que porta engegada la càmera de color.
- 5) Finestra de lectures de la IMU: La IMU de la Azure Kinect està formada per un acceleròmetre i per un giroscopi, així doncs en aquesta finestra es mostren les lectures d'aquests dos components. D'aquesta manera és possible veure una gràfica en temps real del comportament de les acceleracions que es detecten en el dispositiu en els eixos x, y i z; i la velocitat angular "roll", "pitch" i "yaw"^[1]. A més, també es pot veure la temperatura a la que es troba el dispositiu per tenir controlats sobreescalfaments de la càmera (**Figura 18**).

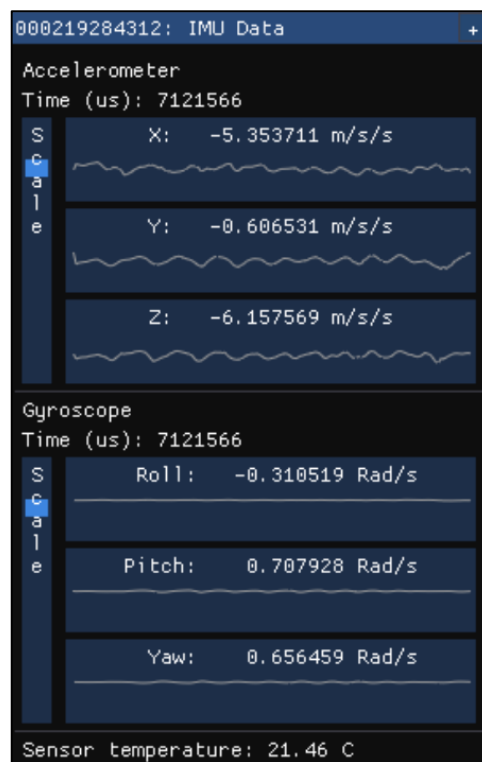


Figura 18 Lectures en temps real de la IMU del dispositiu (Font: Microsoft).

[1] Les direccions x, y i z, i les direccions de gir "roll", "pitch" i "yaw" estan establertes d'acord a la referència de la IMU del dispositiu. En l'apartat "6. Posta en marxa del sensor" d'aquest estudi, es té una explicació completa de quina és la referència d'aquestes direccions i el sentit positiu i negatiu de cadascuna.

- 6) Finestra de notificacions: Permet veure errors i advertències sobre el dispositiu i copiar i guardar els missatges que es generen.

A part d'aquestes funcions, que han estat les més utilitzades per aquest estudi, també es disposa d'una finestra per visualitzar el soroll recollit per diferents canals que disposa la bateria de micròfons, així com un visualitzador en temps real del núvol de punt generat a partir de les dades de profunditat i RGB recollides per la càmera (**Figura 19**).

La funció dels micròfons no s'ha fet servir en el estudi, ja que no s'ha necessitat enregistrar cap àudio. Pel que fa al visualitzador de núvol de punts, únicament s'ha fet servir per fer comparatives a nivell qualitatiu amb el núvol de punts generats a partir del programa dissenyat. Aquest visualitzador de núvol de punts no permet realitzar mesures sobre ell, ni tampoc exportar-lo en un arxiu i obrir-lo en un programa per llegir núvol de punts, per aquest motiu no s'ha pogut fer servir més que qualitativament.

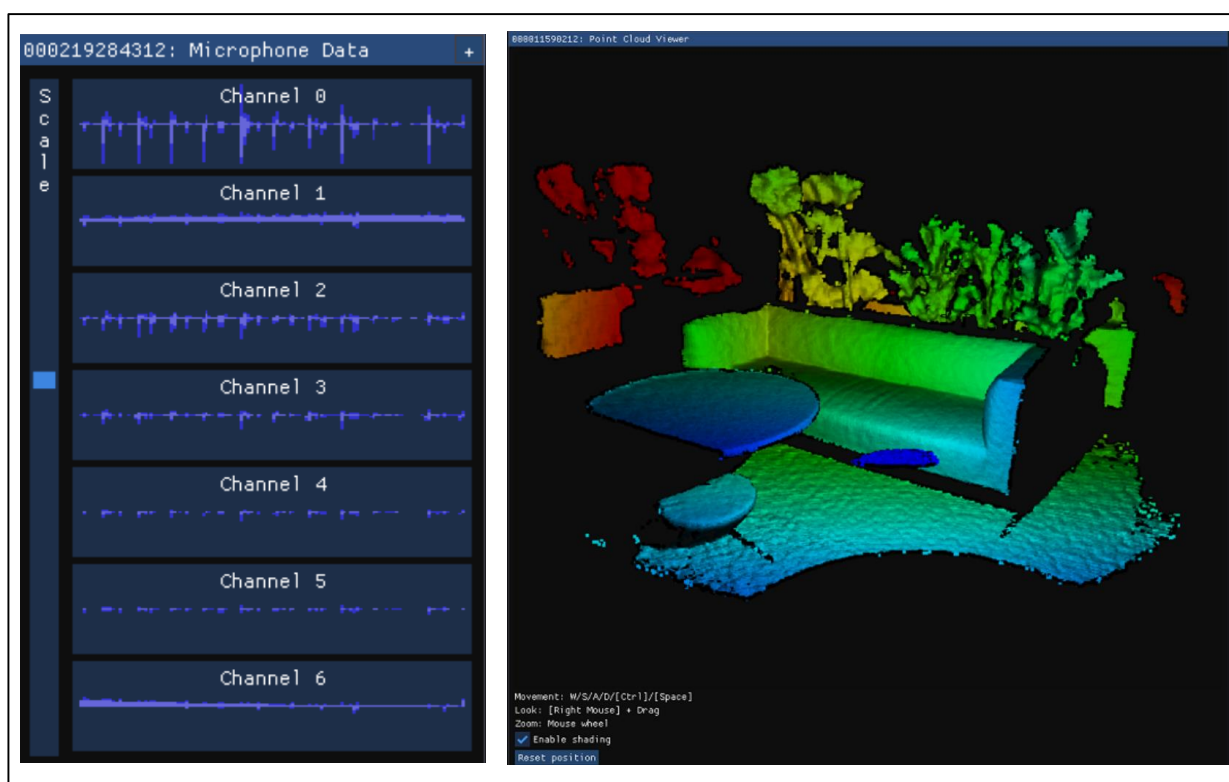


Figura 19 Visualitzador de les lectures de la bateria de micròfons (esquerra) i visualitzador del núvol de punts (dreta) (Font:Microsoft).

5.1.2 *CloudCompare v2.10.2*

CloudCompare és un processador de núvol de punts 3D, així com de malles triangulars i imatges calibrades. Aquest software proveeix a l'usuari d'una sèrie d'eines bàsiques per editar i renderitzar manualment núvols de punts 3D i malles triangulars.

Per fer tot això, compta amb una ampla gamma d'algoritmes de processament avançats per tal de realitzar:

- Projeccions.
- Reconstruccions a partir de diversos núvols de punts.
- Computar distàncies entre punts, núvols o malles.
- Computació estadística.
- Segmentació de núvol de punts.
- Estimació geomètrica d'elements.

A part de les coordenades de cada punt, el programa és capaç de guardar una gran quantitat de valors escalars de cada punt de tal forma que també disposa d'algoritmes per treballar amb aquests escalars. A més, el programa és capaç de treballar amb molt formats d'entre els quals els que més destaquen són: ASCII, PLY, OBJ i BIN, entre molts altres.

Pel que respecta a l'ús que s'ha donat a aquest programa en l'estudi, ha sigut principalment per visualitzar el núvol de punts que es genera en el programa dissenyat en Visual Studio (del que es parlarà més endavant) a partir d'una captura de la càmera. El núvol de punts queda guardat en un directori establert, com a un arxiu amb format PLY el qual es possible obrir en el CloudCompare.

Al carregar l'arxiu en el programa, s'obre una finestra que permet determinar quines són les coordenades x, y i z, així com el color R, G i B, del núvol de punts guardat. També es poden seleccionar els escalars de cada punt que es volen carregar.

Un cop establerts aquests paràmetres, és possible visualitzar el núvol de punts i moure's en l'entorn generat de forma lliure. A partir d'aquí, d'entre les diverses eines que ofereix se n'han utilitzat dos. L'eina informativa que permet seleccionar un punt concret del núvol i mostra les seves coordenades i combinació de colors RGB; i l'eina de mesurament que permet mesurar distàncies entre dos punts del núvol. Aquestes eines han estat necessàries per fer els assajos interiors i exteriors i comprovar que les distàncies i les posicions dels punts eren correctes respecte la mesura real que es feia.

A continuació es mostren les eines i finestres de la interfície del programa (*Figura 20*):

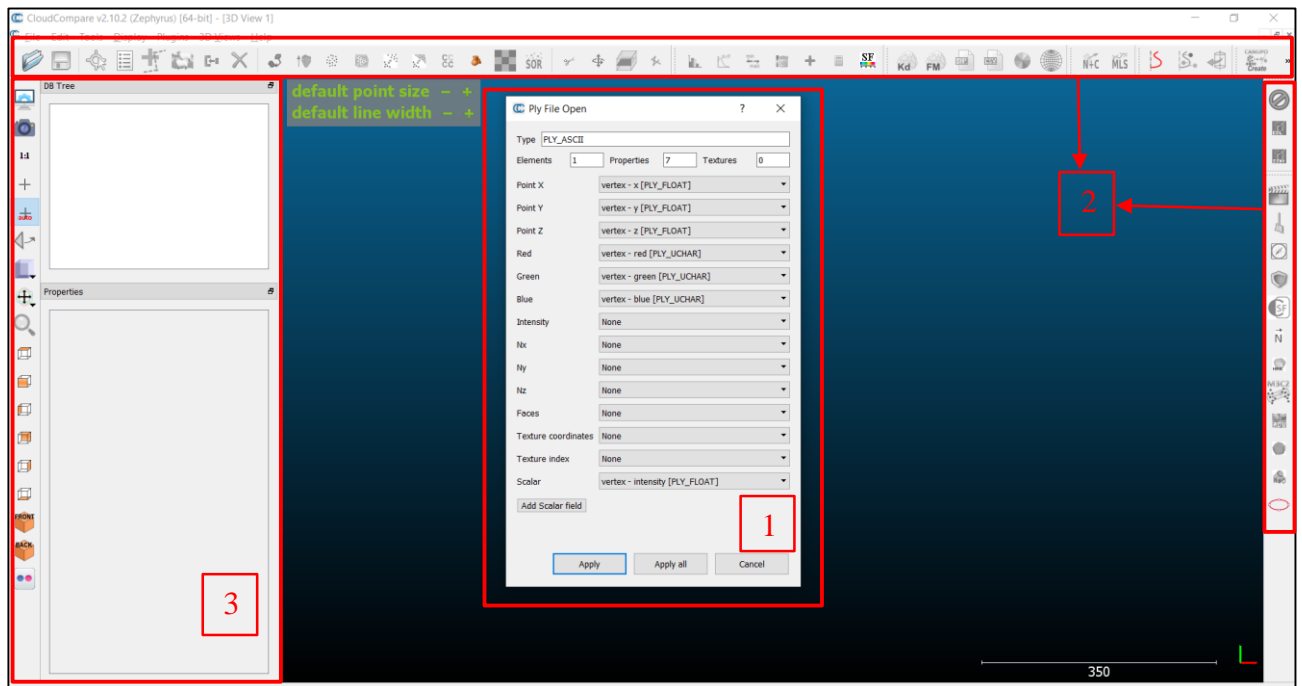


Figura 20 Interfície del programa CloudCompare v2.10.2.

- 1) Finestra càrrega de arxiu: Segons el format de l'arxiu de dades que es vol carregar, el programa ofereix una finestra diferent per seleccionar quina informació correspon a coordenades, quina a colors i quina a escalars (entre d'altres). En el cas de carregar un arxiu PLY, la finestra que s'obre és la que es mostra en la *Figura 20*. El fet de que el programa dissenyat guardi la informació en un arxiu PLY, fa que sigui molt senzill detectar els diferents paràmetres guardats en el núvol de punts a l'hora d'obrir-lo en el CloudCompare.
 - 2) Barres d'eines: Contenen totes les funcions per operar amb les eines i algoritmes dels que s'ha parlat anteriorment. Permeten treballar directament sobre el núvol de punts carregat.
 - 3) Eines de visualització, arbre d'elements i finestra de propietats: Aquesta secció permet accedir a una vista concreta del núvol de punts d'acord amb el sistema de referència que es té. També permet fer captures i guardar posicions concretes de la vista del núvol de punts. L'arbre d'elements únicament serveix per donar informació a l'usuari dels diferents arxius que es tenen oberts i a quin directori pertany cadascun.
- Per últim, la finestra de propietats permet seleccionar diferents funcions de l'arxiu amb que es treballa: activar o no els escalars que es desitgin, jugar amb la escala de intensitats, etc.

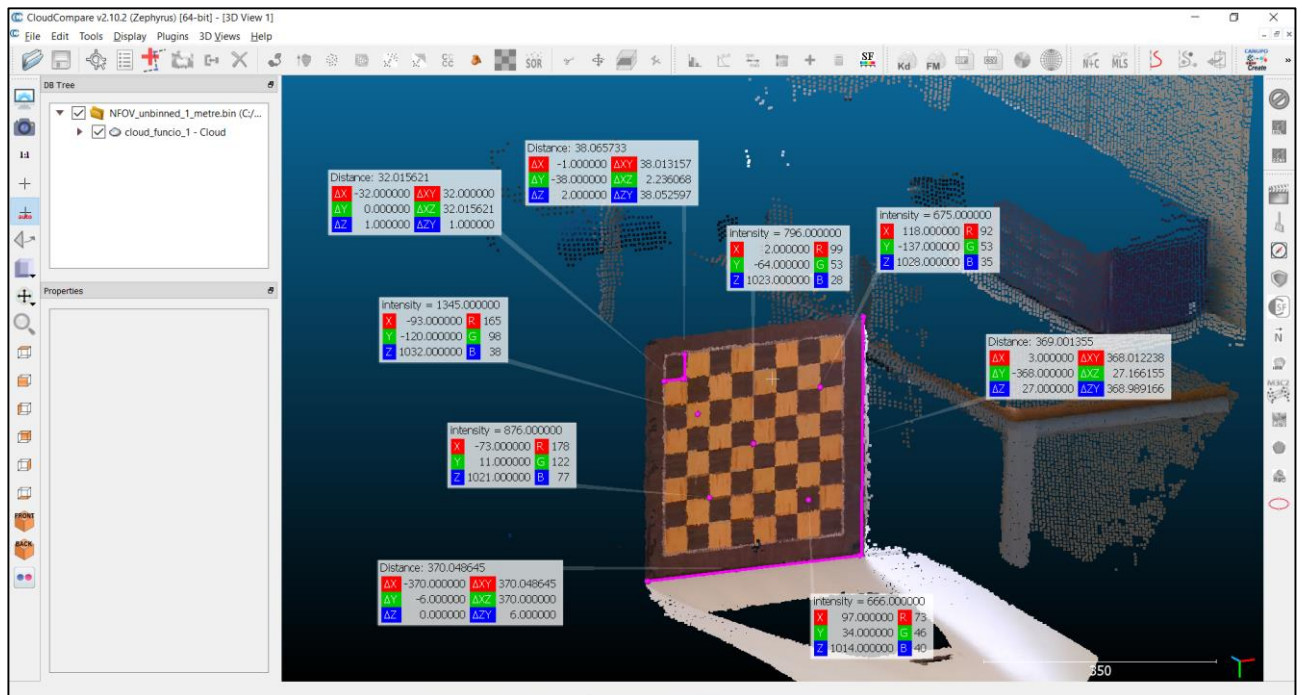


Figura 21 Exemple de l'ús del CloudCompare en aquest estudi. Els punts i les línies en rosa són elements dels que es vol conèixer la seva informació. El programa genera un quadre de text amb la posició o distàncies en les coordenades x , y i z i la combinació de color RGB corresponent de cada element seleccionat.

En la **Figura 21** es pot veure un exemple de l'ús d'aquest programa en aquest estudi. A partir de la captura d'un blanc i la seva transformació en núvol de punts, es poden prendre mesures de distàncies entre els punts i comparar amb les distàncies reals per conèixer si hi ha algun error en la captura. El mateix es pot fer amb punts concrets, que havent mesurat les seves coordenades reals respecte la referència de la càmera, es pot comparar si en el núvol es manté la posició dels punts i no hi ha errors excessius.

5.1.3 Altres programes utilitzats

- Software Visual Studio 2017, per dissenyar un programa en C/C++ per controlar la càmera i generar els núvols de punts.
- Software per fer captures amb la Kinect V2, dissenyat en estudis previs per part del grup de recerca.
- Software AutoCAD 2016, per dibuixar els esquemes i plànols de l'estudi.
- Software Microsoft Office Word 2016, per la realització dels documents de l'estudi.
- Software Microsoft Office Excel 2016, per la realització de taules i càlculs de l'estudi.
- Software Microsoft Office PowerPoint 2016, per la realització de la presentació de l'estudi.

6. POSTA EN MARXA DEL SENSOR

6.1 Primers passos

6.1.1 Test general

Configurar el hardware

Primerament es necessita conèixer si tots els components del sensor funcionen correctament. Per poder saber si existeix alguna peça defectuosa o si la màquina no respon correctament, s'ha seguit el següent procediment:

- 1) Reconeixement visual per comprovar que es disposa de tots els components que es descriuen en el kit, i comprovació de que no existeix cap desperfecte físic en els elements que es mostren en la **Figura 22**, que es tracta d'un esquema dels elements principals que formen el dispositiu, facilitat pel propi fabricant.

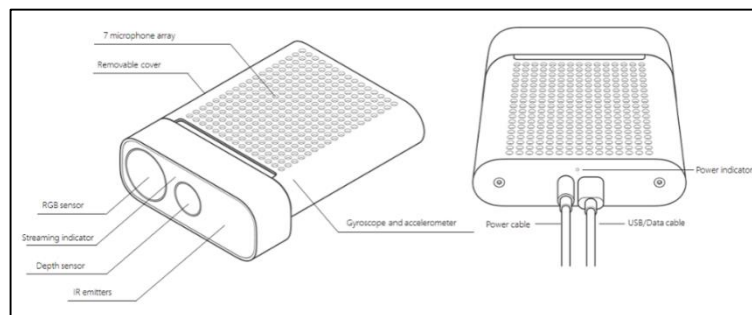


Figura 22 Esquema de components de la Azure Kinect, proporcionat pel fabricant (Font: Microsoft).

En principi tots els elements es poden veure a simple vista excepte la bateria de micròfons, el giroscopi i l'acceleròmetre. A la bateria de micròfons és possible accedir-hi gràcies a que hi ha una tapa protectora de la càmera que es pot extreure tal com es mostra en la **Figura 23**. L'acceleròmetre i el giroscopi no es poden veure ja que estan en la part interna del dispositiu, per tant només es podrà comprovar el seu funcionament des del visualitzador.



Figura 23 Azure Kinect amb la tapa protectora extreta.

2) Per a que el dispositiu arranqui es necessita connectar-lo a una xarxa elèctrica domèstica a través d'un endoll inclòs en el kit del dispositiu (el qual necessitarà un adaptador Estats Units – Europa) i a un ordinador a través d'un port USB (preferiblement 3.0 per evitar problemes de reconeixement de la càmera). Es necessita verificar que un cop es tenen les dues connexions fetes (**Figura 24**), s'encén un indicador LED de color blanc sòlid en el dispositiu, tal com es mostra en la **Figura 25**. En cas de que el LED blanc pampallugui vol dir que al dispositiu li arriba corrent però la connexió del USB no s'ha fet en un port 3.0 del ordinador. També pot passar que en comptes de encendre's una llum blanca, aparegui una llum taronja que pampallugui, lo qual indica que al dispositiu no li arriba corrent suficient de la xarxa com per funcionar.

Cap la possibilitat de que s'encengui una llum taronja precedida de una blanca quan s'estan executant restauracions i actualitzacions del dispositiu.



Figura 24 Connexions que necessita la Azure Kinect per a la seva arrancada. A l'esquerra de la imatge es té l'endoll amb el adaptador corresponent, i a la dreta es té el USB.

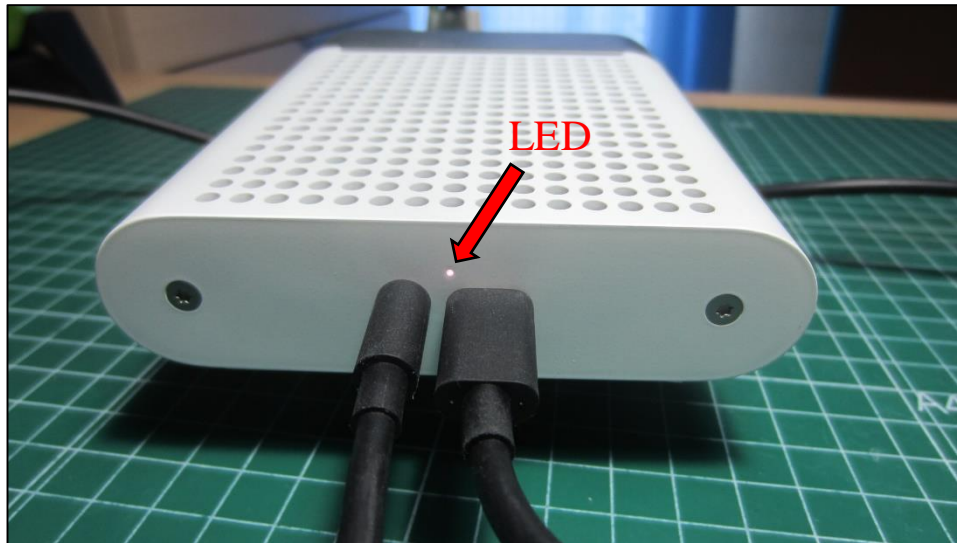


Figura 25 LED indicatiu de que s'han realitzat correctament les connexions de la càmera.

- 3) Un cop instal·lat el visualitzador “*Azure Kinect Viewer v1.3.0*”, es pot iniciar la màquina i veure en diferents finestres el que està enfocant cada càmera del dispositiu^[2]. És necessari comprovar que tenint el dispositiu en funcionament s'engega un LED blanc entre la càmera RGB i la de profunditat, així com també es pot comprovar que s'estan emeten rajos infraroig ja que es veu una llum vermella al cantó de la càmera de profunditat (**Figura 26**). Cal aclarir, que tot i que es tracta d'un sistema que està qualificat com a segur per la vista humana, és preferible no mirar directament al sensor a l'hora de fer aquesta comprovació.



Figura 26 Imatge frontal de la Azure Kinect en funcionament.

[2] Veure apartat “*Configurar el visualitzador i el firmware*”.

Configurar el visualitzador i el firmware

Un cop es tenen fetes les connexions pertinents i s'ha instal·lat el visualitzador "Azure Kinect Viewer v1.3.0", s'ha de comprovar que es reconeix al dispositiu. Si s'obre el visualitzador i no es detecta el dispositiu, apareixerà un missatge de que no hi ha cap dispositiu disponible. En canvi si es detecta, apareix un missatge reconeixent el número de sèrie del dispositiu i queda disponible la opció de arrancar-lo i entrar en el menú per començar a operar amb la càmera (**Figura 27**).

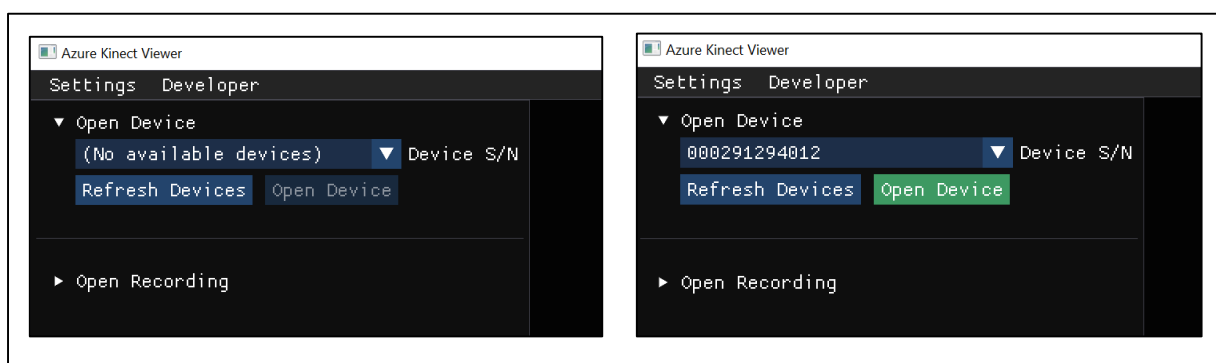


Figura 27 Missatge d'entrada del visualitzador de la càmera. A l'esquerra es pot veure el missatge d'error al no reconèixer el dispositiu. A la dreta es pot veure el número de sèrie de la càmera detectada.

Un cop s'ha reconegut el dispositiu i s'arranca en el visualitzador, és necessari comprovar la versió del Firmware. Si no està actualitzat pot suposar problemes en el funcionament correcte de la càmera, així com problemes de compatibilitat amb el visualitzador.

Per conèixer la versió que es té del Firmware, així com per actualitzar-lo si fos necessari, s'ha d'utilitzar l'eina "AzureKinectFirmwareTool.exe" que s'instal·la en l'ordinador juntament amb el visualitzador (**Figura 28**). Aquesta eina s'ha d'invocar des de la finestra de comandament de l'ordinador ja que no disposa de interfície, i s'han d'introduir les línies de codi que es troben disponibles en la pàgina web del fabricant.

```

▼ Device Firmware Version Info
  RGB camera: 1.6.102
  Depth camera: 1.6.75
  Audio: 1.6.14
  Build Config: Release
  Signature type: Microsoft
  
```

Figura 28 Versió de Firmware de la Azure Kinect utilitzada en aquest estudi.

Comprovació general del funcionament de les càmeres

L'últim pas d'aquest test general consisteix en comprovar el correcte funcionament de les càmeres a través del visualitzador. Simplement es dona un primer cop d'ull per comprovar que no existeix cap error greu en les càmeres i que tant aquestes com la IMU i els micròfons són detectats i es mostren al visualitzador.

Per fer això, s'ha col·locat un blanc enfront de la càmera, que en aquest cas ha sigut un prisma rectangular, i s'ha comprovat que el que es veu sigui correcte en el visualitzador, tant en la vista 2D com la vista en 3D. En tests que es realitzaran posteriorment, ja s'estudiarà amb més detall cada un dels elements del visualitzador.

S'ha pogut veure, tal com es mostra en la **Figura 28**, que les lectures del visualitzador són correctes ja que tots els elements estan en funcionament i no es presenten problemes de color o de geometria en cap de les càmeres. Per tant, es pot avançar cap a nous tests.

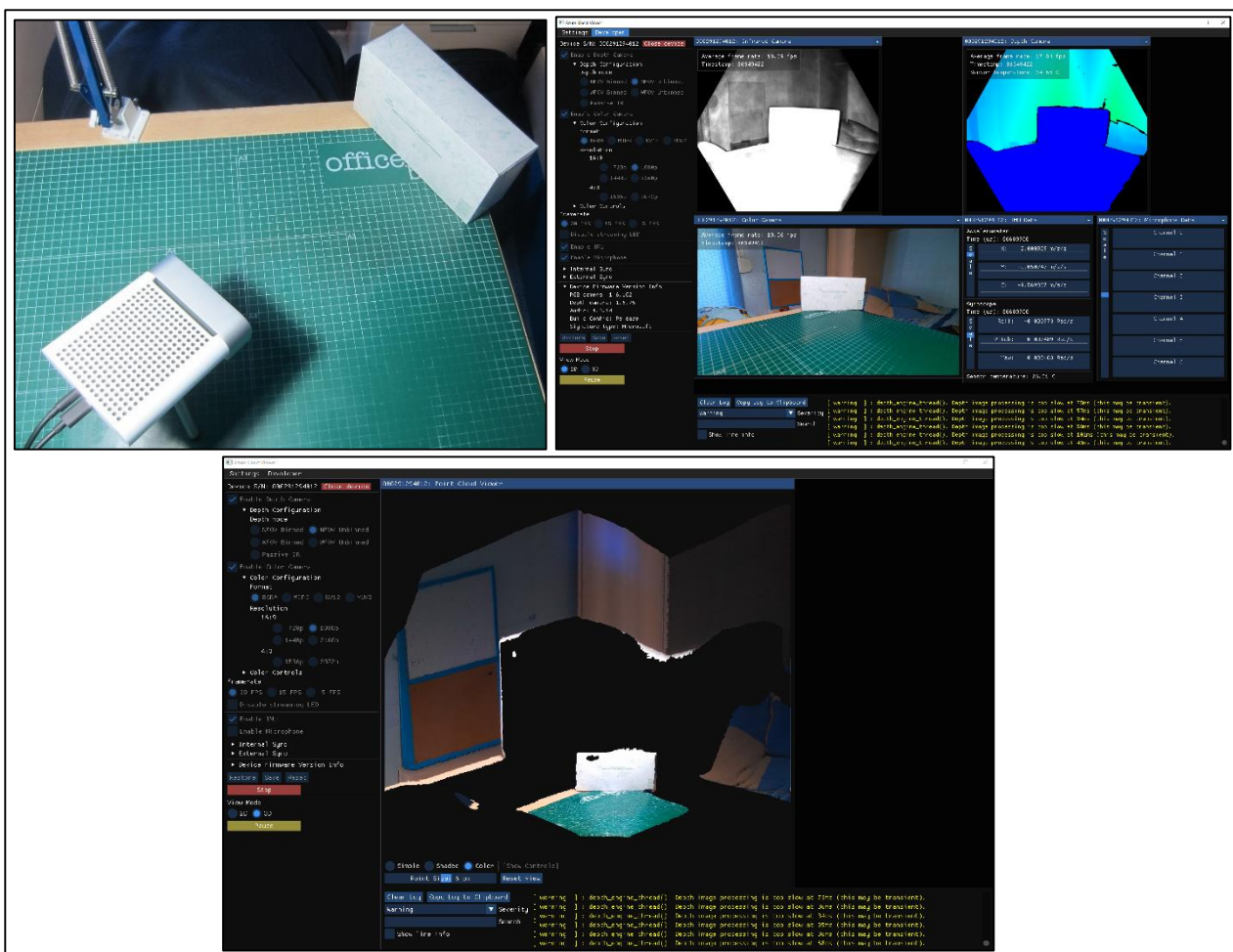


Figura 29 Test del funcionament general del dispositiu a través del visualitzador. A dalt a l'esquerra es veu la posició de la càmera i del blanc. A dalt a la dreta, les lectures del visualitzador en 2D. A sota, les lectures del visualitzador en 3D.

6.1.2 Tests de configuracions

La idea d'aquest test consisteix en conèixer les diferents opcions i modes que s'ofereixen pel que fa a la càmera de color i la càmera de profunditat, i comprovar que funcionin.

Càmera de color

Pel que fa la càmera de color, és possible seleccionar diferents formats (depenent de l'arxiu d'imatge o foto que es vulgui generar), resolucions (segons dimensions de pantalla 16:9 o 4:3) i FPS. No totes les opcions són compatibles entre si, sinó que hi ha unes certes limitacions en les combinacions que es poden fer. Per aquest motiu el fabricant facilita una taula que es pot veure en la **Figura 30**. A més, es pot fer un tractament de la imatge, independentment de la configuració seleccionada, mitjançant el controlador de color on es pot ajustar la brillantor, el contrast, la saturació, la nitidesa i el guany, entre altres paràmetres.

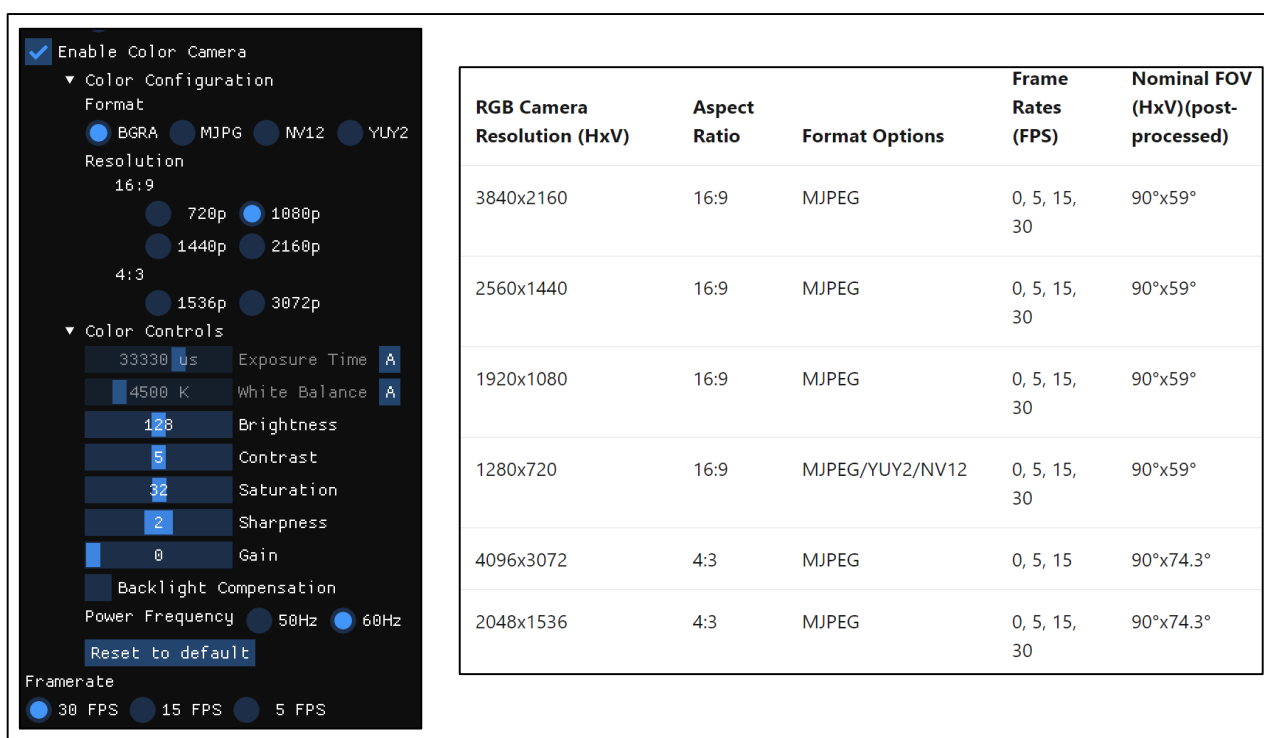


Figura 30 A l'esquerra es veu la finestra de les opcions que es poden seleccionar per a la càmera de color, que corresponen a la taula de la dreta la qual conté les configuracions possibles d'acord al fabricant (Font: Microsoft).

Un cop feta la comprovació de que totes les combinacions funcionen correctament es pot passar a veure les configuracions de la càmera de profunditat.

Càmera de profunditat

Per la càmera de profunditat existeixen diferents modes segons el que es vulgui aconseguir:

- **Narrow Field Of View (NFOV) Unbinned:** Utilitzat quan es vol tenir un camp de visió estret. Consisteix en limitar l'amplitud dels laterals de la imatge i guanyar en profunditat.
- **Wide Field Of View (WFOV) Unbinned:** Utilitzat quan es vol tenir un camp de visió ample. Així doncs, és possible tenir una vista ampliada del escenari, però perdent rang de profunditat.
- **NFOV i WFOV Binned:** Funcionen igual que els modes vistos anteriorment però fa una compressió de les dades de manera que es guanya més rang tant en profunditat com en amplitud, però a canvi de perdre resolució en la imatge. Està pensat per fer captures ràpides ja que té un processat que suposa menys temps de computació que els altres modes.
- **Passive IR:** Mode especial que només serveix per visualitzar la il·luminació infraroja i desactivar la resta de modes de visualització.

En aquest test únicament s'ha comprovat que tots els modes funcionin, tal com es pot veure en la **Figura 31**. L'estudi dels rangs de cadascun dels modes i la decisió de quin serà l'utilitzat per aquest estudi, es realitzarà en el calibratge de la càmera pels assajos interiors i exteriors.

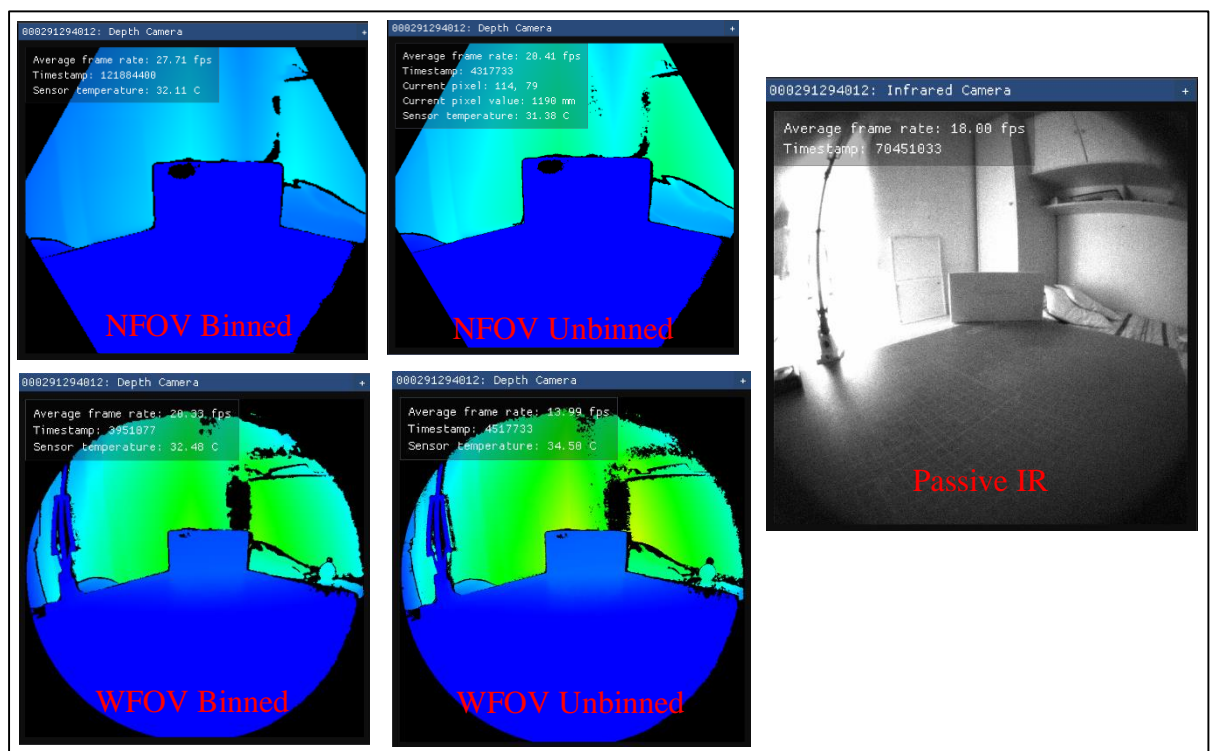


Figura 31 Comparativa dels diferents modes de profunditat de la Azure Kinect.

6.1.3 Test de sistemes de referència i IMU

Existeixen dos tipus de sistemes de coordenades en el dispositiu, els 2D i els 3D.

La càmera de profunditat i la de color estan associades a un sistema de coordenades independent 2D, de manera que a l'hora de enregistrar cada píxel hi hagi una relació entre la seva posició i la seva combinació de colors. Així doncs, una coordenada $[x,y]$ es representa en unitats de píxels, i les dimensions d'aquests píxels sempre seran de 1×1 .

Aquest sistema de coordenades únicament indica la posició en la que et trobes en una malla de píxels, així doncs l'origen $[0,0]$ sempre es situa en el vèrtex superior esquerre del conjunt de píxels, i s'utilitzen subpíxels com a coordenades per indicar en quina zona concreta de un píxel et trobes. Així doncs, amb aquest sistema de subpíxels, el centre del primer píxel s'indica com $[0.0,0.0]$ i la seva cantonada inferior dreta seria $[0.5,0.5]$. En la **Figura 32** es poden veure alguns exemples de coordenades preses sobre un conjunt de píxels per tal que sigui més clarificador.

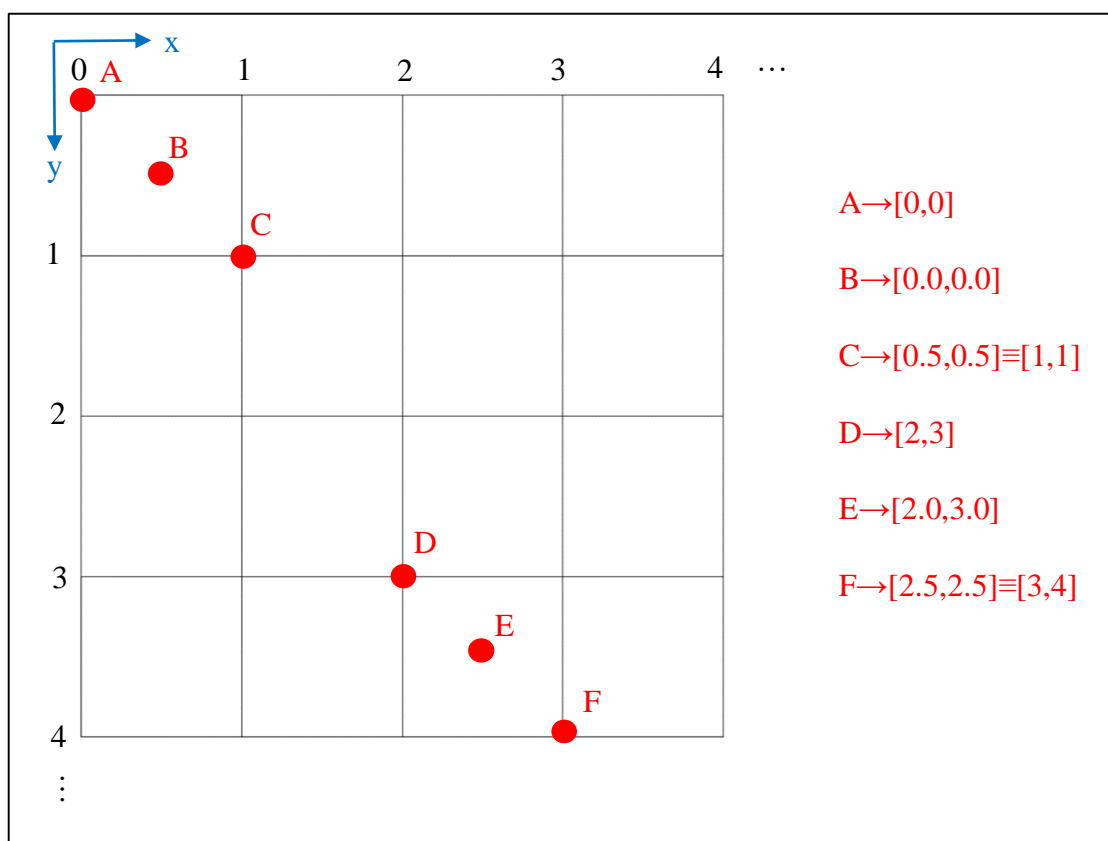


Figura 32 Esquema del sistema de coordenades 2D associat a les càmeres de profunditat i de color. Cadascun dels quadrats representa un píxel i sobre aquests s'han pres els punts A, B, C, D, E i F, on es pot observar a la dreta, la coordenada que li correspon en el sistema de píxels, i l'equivalent en subpíxels segons el punt.

És un sistema bastant complex i que no és possible testejar de forma física, per tant es suposa que funciona correctament i es confirmarà un cop es vegi que els tests amb els sistemes de coordenades 3D que es tenen en la càmera de color, de profunditat i la IMU són correctes.

Càmera de color i de profunditat

Segons el fabricant, l'origen del sistema de referència de la càmera de color i profunditat es troba al centre de l'objectiu de cadascuna sobre la superfície del dispositiu. Des de la posició dels objectius de cada càmera, el positiu de l'eix x va cap a la dreta, el de l'eix y va cap a baix, i el de l'eix z va cap endavant. Aquestes direccions i sentits positius es poden veure en la **Figura 33**.

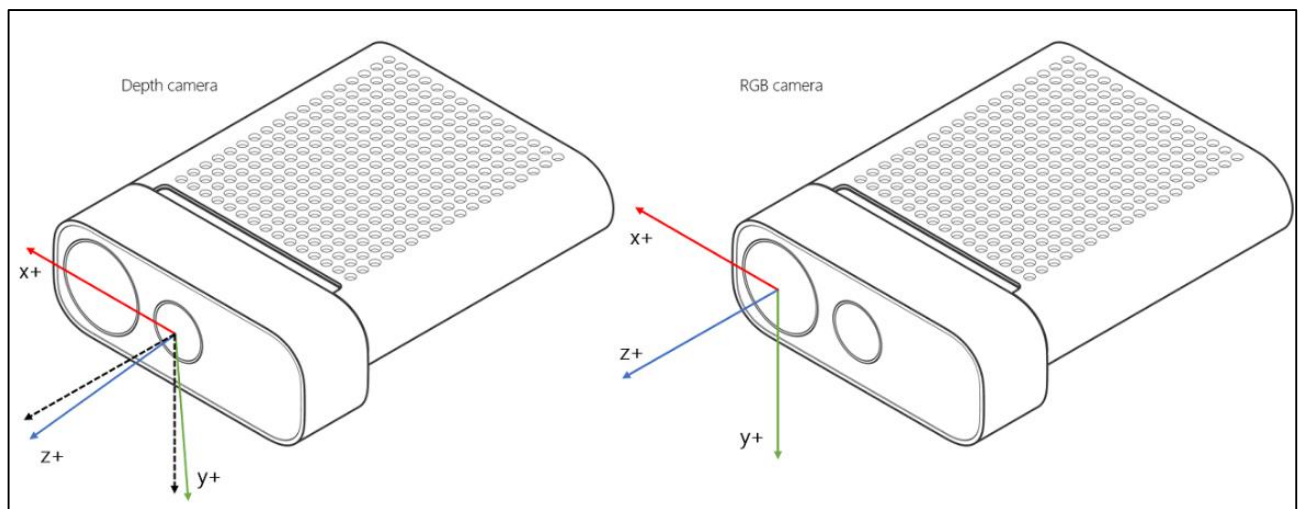


Figura 33 Sistemes de referència 3D, facilitats pel fabricant (Font: Microsoft).

És important fer una observació i és que d'acord al fabricant, el sistema de referència de la càmera de profunditat està girat en sentit antihorari, sobre l'eix x, 6 graus respecte al de la càmera de color. A més, la càmera de profunditat disposa de dos emissors de IR segons el mode de profunditat seleccionat (NFOV o WFOV). El de NFOV manté exactament el mateix sistema de referència que la càmera de profunditat, però el WFOV està desfasat 1,3 graus més (a part dels 6 graus ja desfasats) del sistema de referència de la càmera de profunditat.

En aquest test no es comprovaran els graus de inclinació de la càmera de profunditat, ja que això es farà a l'hora de calibrar la càmera. Si que es mirarà que per als diferents modes de profunditat, es detecti a través del visualitzador diferents profunditats del blanc que tingui la càmera en temps real, és a dir, veure si realment s'està detectant un canvi positiu en la coordenada z tant per al mode NFOV com per al WFOV.

El visualitzador no permet veure les coordenades en x i en y, per tant aquest test s'acabarà de completar al realitzar el calibratge de la càmera, on a partir del núvol de punts i el programa CloudCompare, ja es podran prendre coordenades en x, y i z de la càmera, i comparar-los amb les que es tenen realment.

Per tant, per realitzar aquest test qualitatiu s'ha utilitzat com a blanc un prisma rectangular tal i com s'ha fet amb el test per la comprovació del funcionament general de les càmeres. Així doncs, s'ha comparat si es detecta diferència de profunditat entre el blanc que està en primer pla i el seu fons.

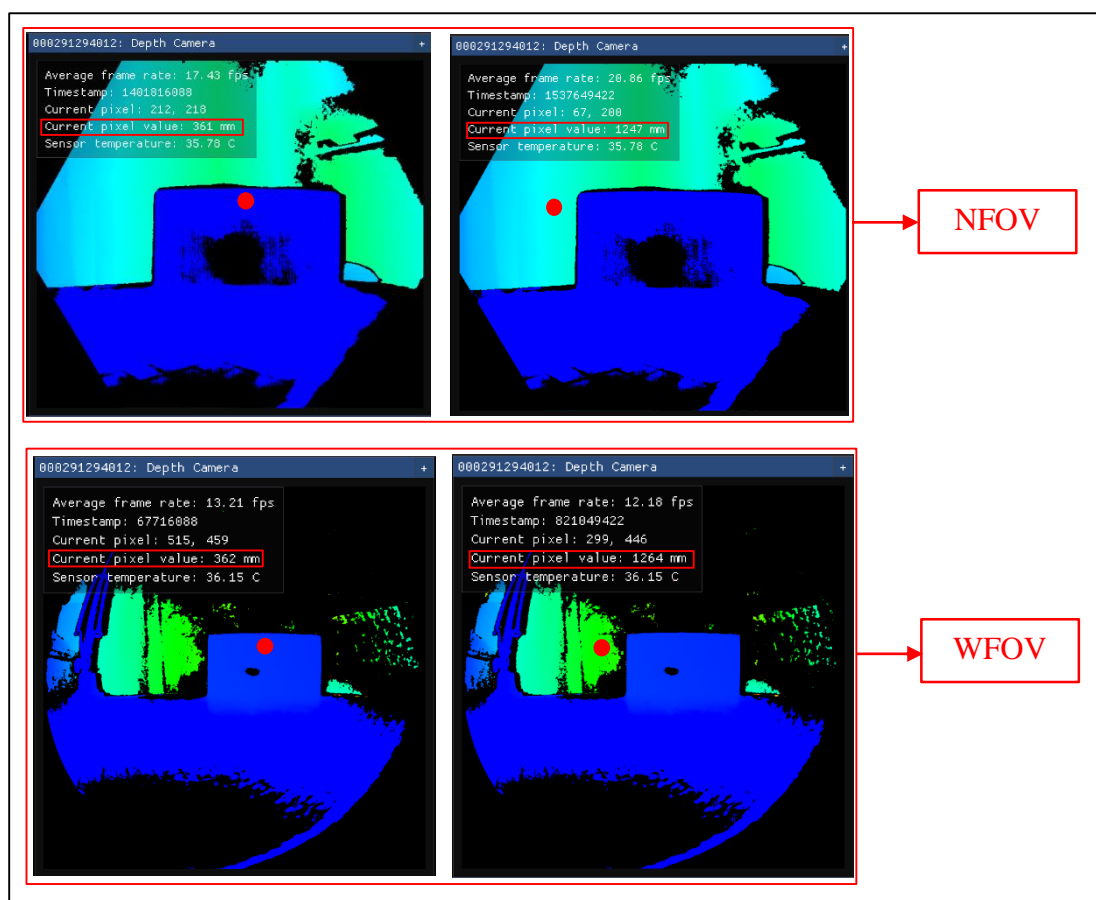


Figura 34 Comprovació del correcte funcionament del sistema de referència de la càmera de profunditat. Els punts vermells representen la posició dels píxels mesurats, i en els quadrats vermells es poden llegir les distàncies a les que es troba cada píxel mesurat, respecte l'origen de la càmera de profunditat.

Els resultats del test es poden observar en la **Figura 34**. Per als dos modes de profunditat s'ha mesurat un píxel sobre el blanc i un altre sobre el seu fons i en els dos cassos s'han observat variació positiva en l'eix z, per tant a espera de obtenir els resultats dels altres eixos al realitzar el calibratge de la càmera, es considera que el sistema de referència facilitat pel fabricant està correctament implementat en el dispositiu adquirit.

D'entrada, de la càmera de color no es pot testejar el sistema de referència, ja que només dona lectures d'imatges a color en el visualitzador i no es pot seleccionar cap píxel per conèixer la seva posició. Per tant, es dona per correcte sempre i quan al generar el núvol de punts en un futur no es presentin problemes amb els píxels que continguin una combinació de colors RGB.

IMU

Com s'ha comentat anteriorment, la IMU del dispositiu està formada per un acceleròmetre i un giroscopi. L'origen del sistema de coordenades 3D del giroscopi és el mateix que el de la càmera de profunditat, mentre que el de l'acceleròmetre coincideix amb el lloc físic en que es troba aquest dins del dispositiu. Els sistemes de referència de l'acceleròmetre i del giroscopi segueixen les mateixes direccions que els de la càmera de color i profunditat, però el nom dels eixos i el sentit positiu dels mateixos és diferent d'acord amb el fabricant (**Figura 35**).

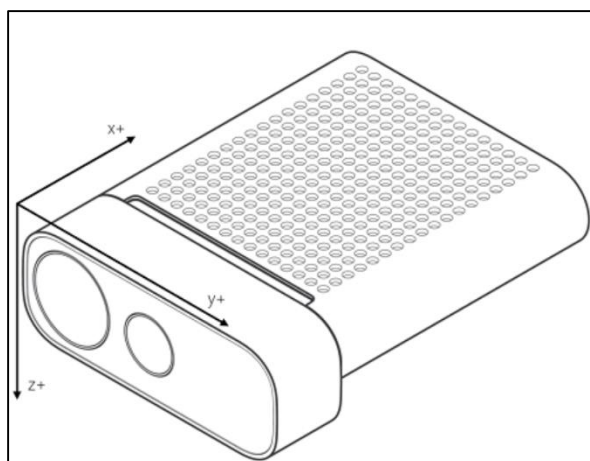


Figura 35 Sentits positius del sistema de referència 3D, de l'acceleròmetre i del giroscopi (Font: Microsoft).

En aquest test s'ha buscat comprovar que els moviments de la càmera es recullen correctament i en les direccions corresponents als eixos de l'acceleròmetre i el giroscopi proporcionats pel fabricant.

Per estudiar l'acceleròmetre s'han realitzat moviments repetits de la càmera en cadascun dels eixos, per tal de generar acceleracions en cada eix i que així apareguin moviments en les gràfiques generades del visualitzador (veure de **Figura 36** a **Figura 39**). Es pot observar com hi ha una detecció en cadascun dels eixos i en especial es pot veure que en respòs només es detecta una acceleració constant en l'eix z, corresponent a la gravetat (també es detecten acceleracions molt petites en els eixos x i y que molt possiblement es degut a petits errors en les lectures de l'acceleròmetre que rep vibracions al trobar-se dins de la màquina en funcionament, es considera que són errors menyspreables).

Repòs:



Figura 36 Gràfiques en repòs.

Moviment en x:

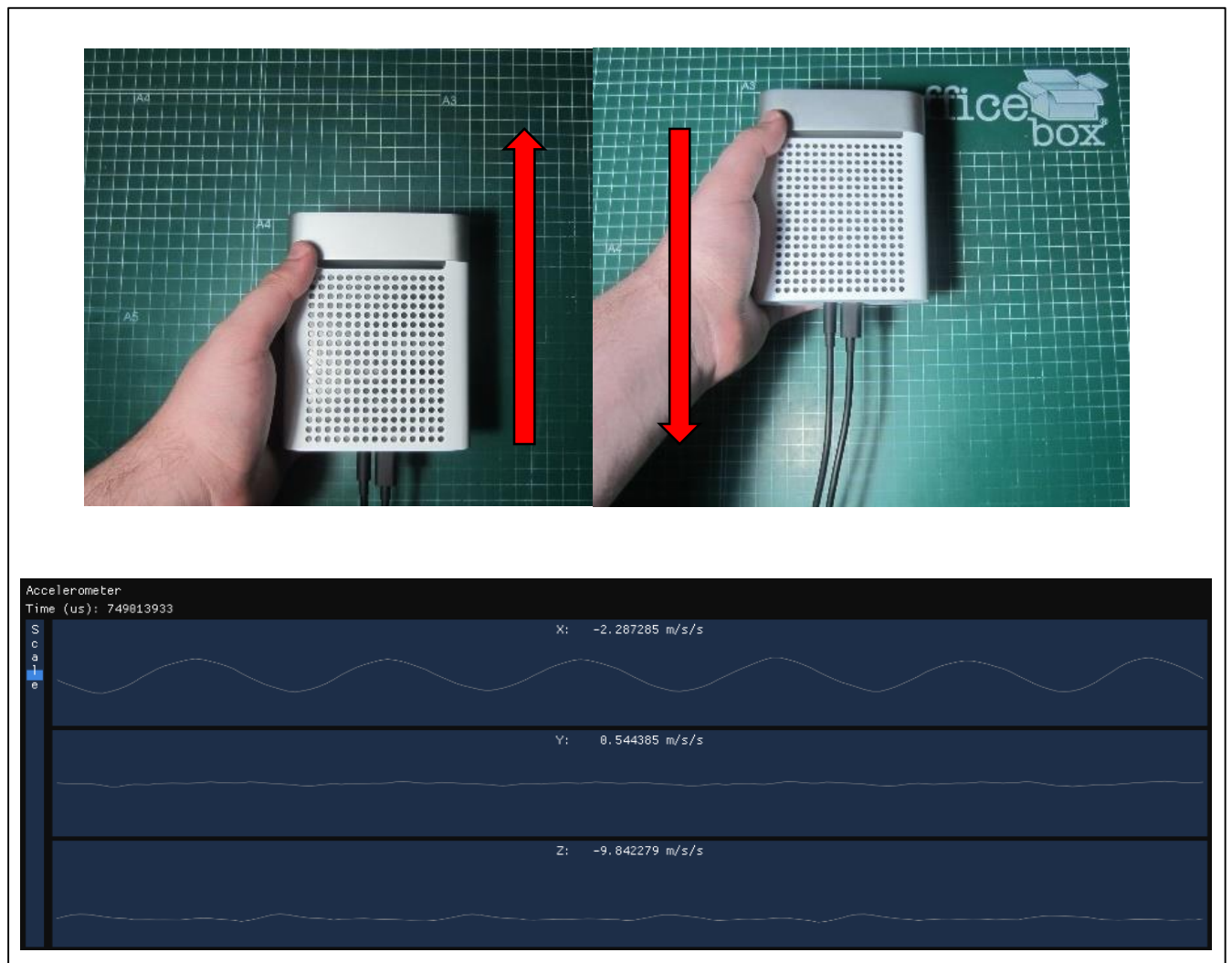


Figura 37 Gràfiques amb moviment en x.

Moviment en y:

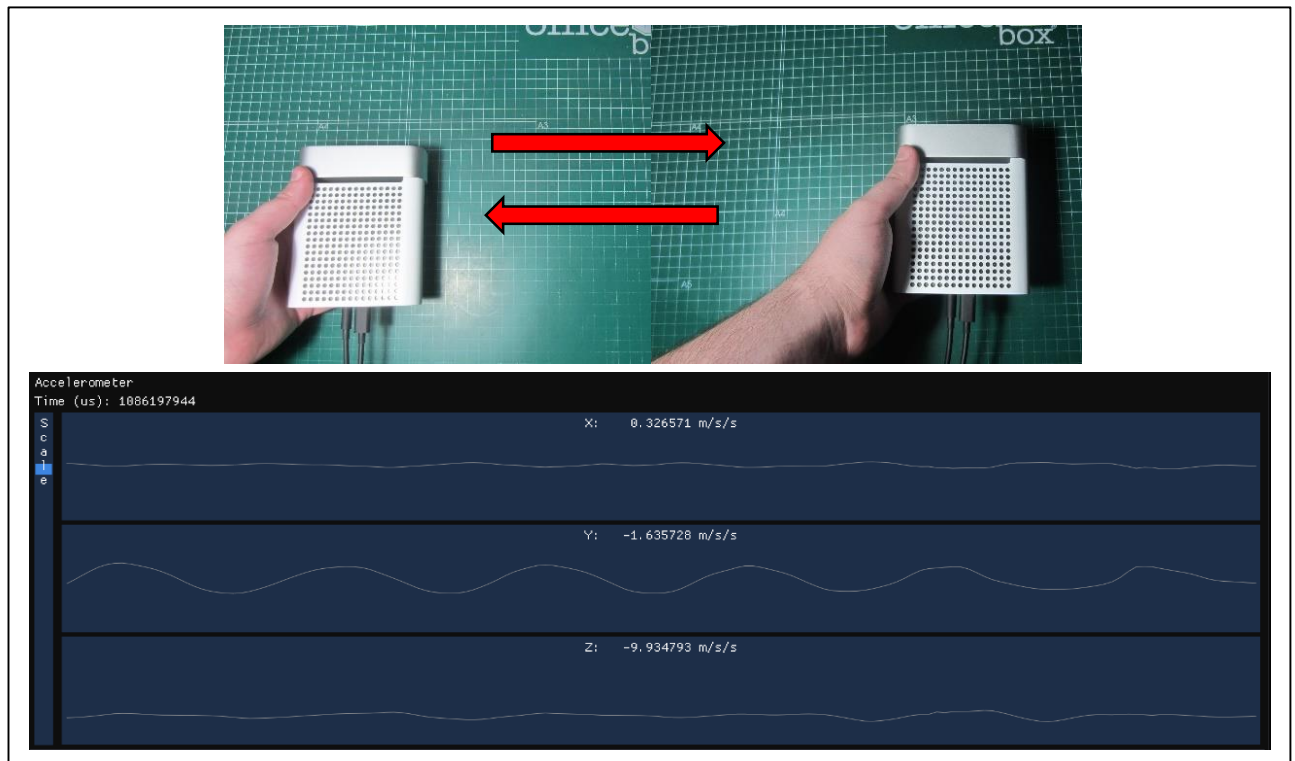


Figura 38 Gràfiques amb moviment en y.

Moviment en z:

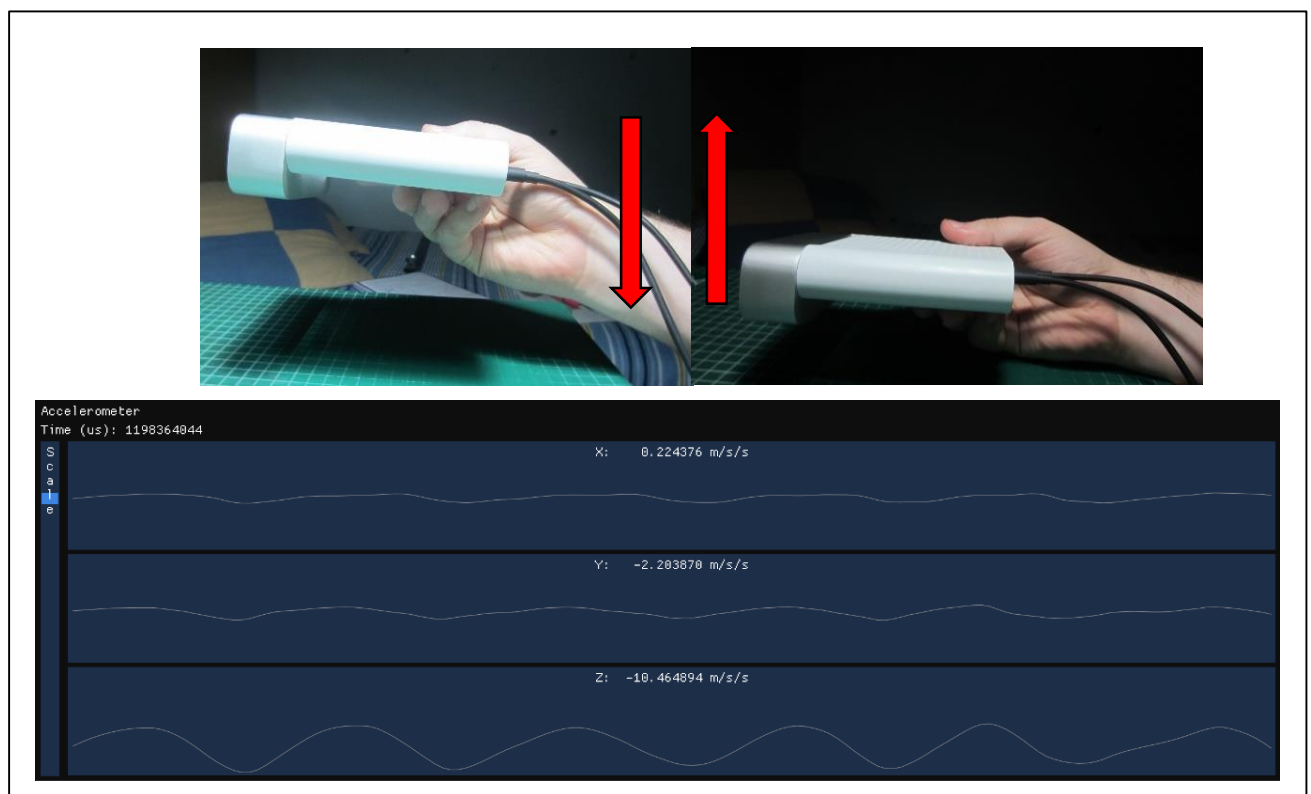


Figura 39 Gràfiques amb moviment en z.

Pel cas del giroscopi no s'han comprovat els seus eixos, sinó els girs que es produeixen sobre cada eix. Així doncs, des del visualitzador és possible visualitzar la velocitat angular que provoca el gir sobre cadascun dels eixos. Aquests girs venen anomenats per propi fabricant com:

- Roll: Pel gir sobre l'eix x.
- Pitch: Pel gir sobre l'eix y.
- Yaw: Pel gir sobre l'eix z.

Per tant, el test en el giroscopi ha consistit en provocar un gir repetides vegades sobre cadascun dels eixos, i comprovar que per el visualitzador es tenien lectures de cadascun dels tipus de gir (veure *Figura 40*, *Figura 41* i *Figura 42*).

Es pot observar en les lectures obtingudes, que es veu clarament una ondulació en cada tipus de gir, cosa que indica que el giroscopi està detectant les velocitats corresponents a cada gir, de forma correcta.

Roll:

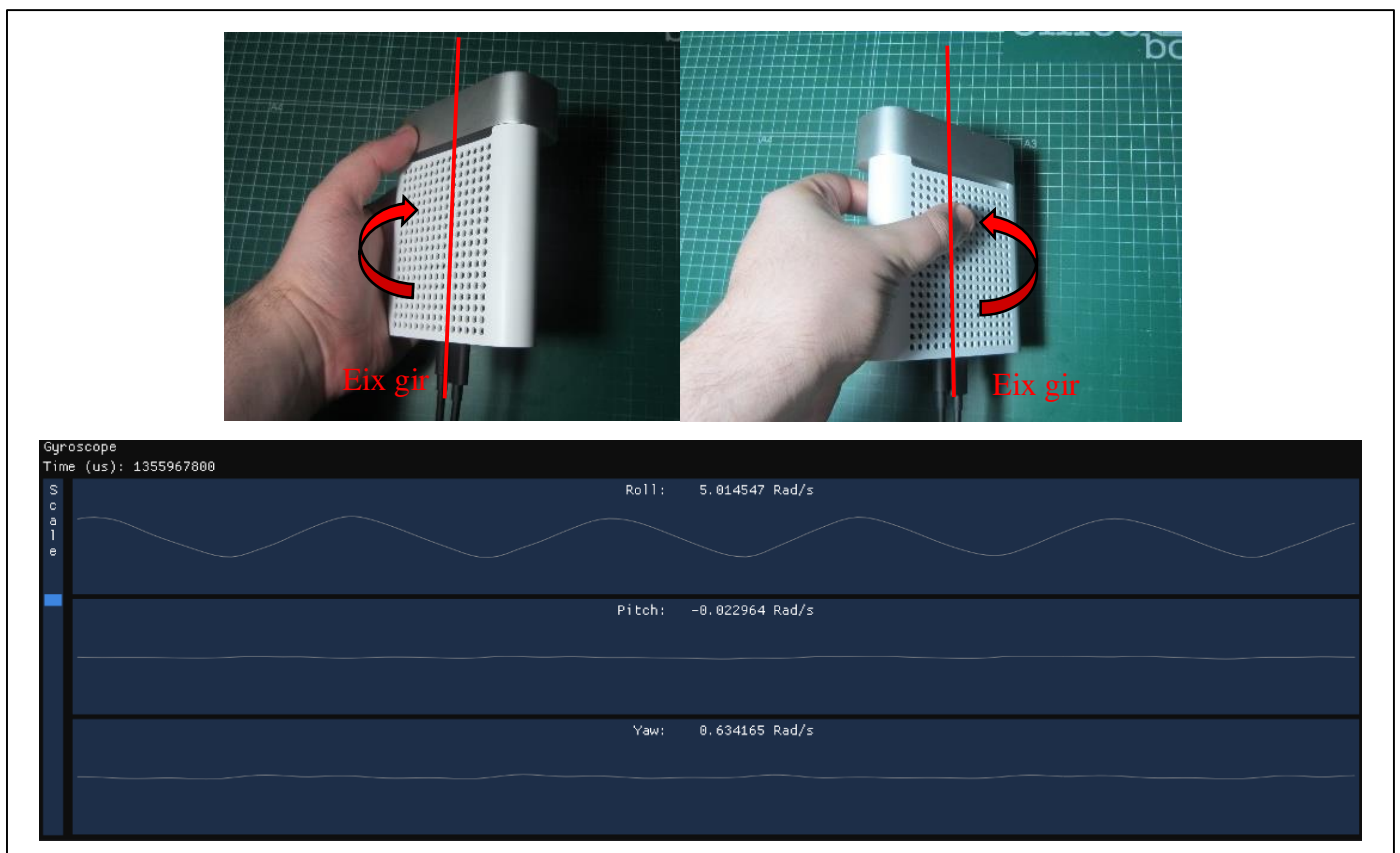


Figura 40 Gràfiques amb gir "roll".

Pitch:

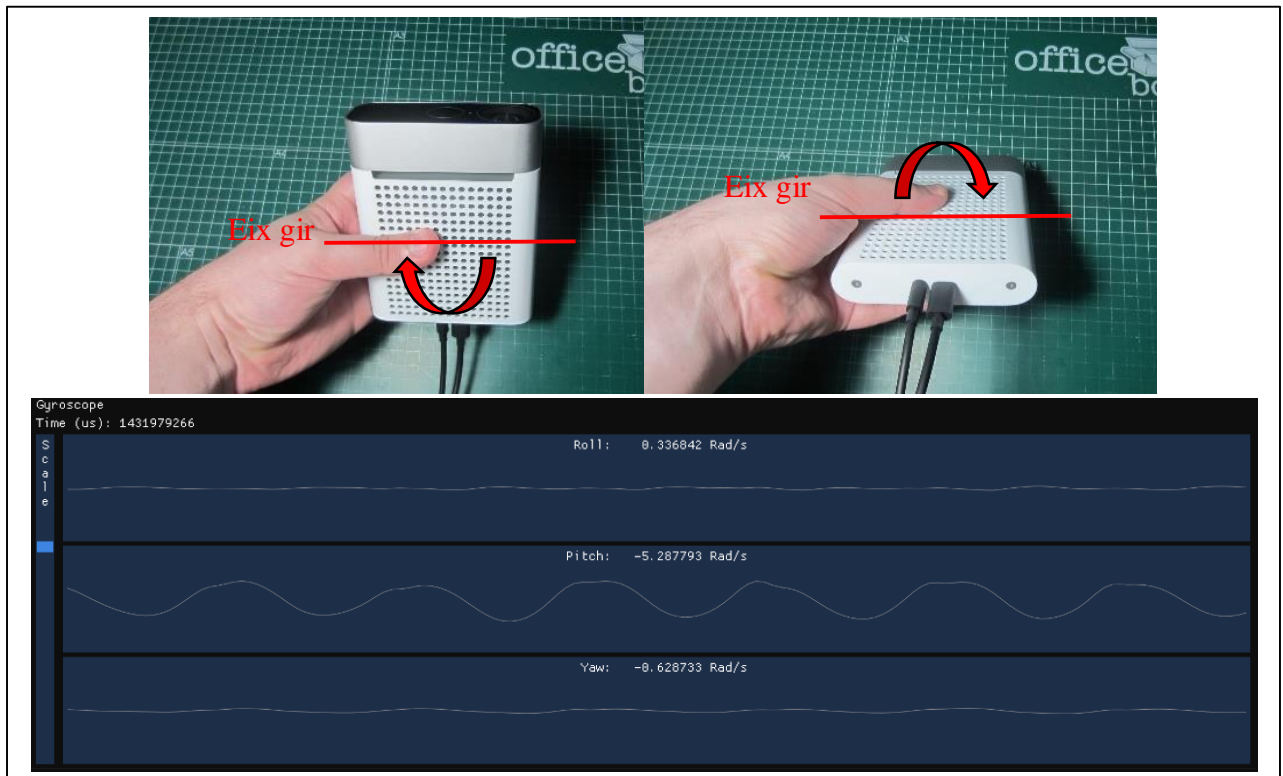


Figura 41 Gràfiques amb gir "pitch".

Yaw:

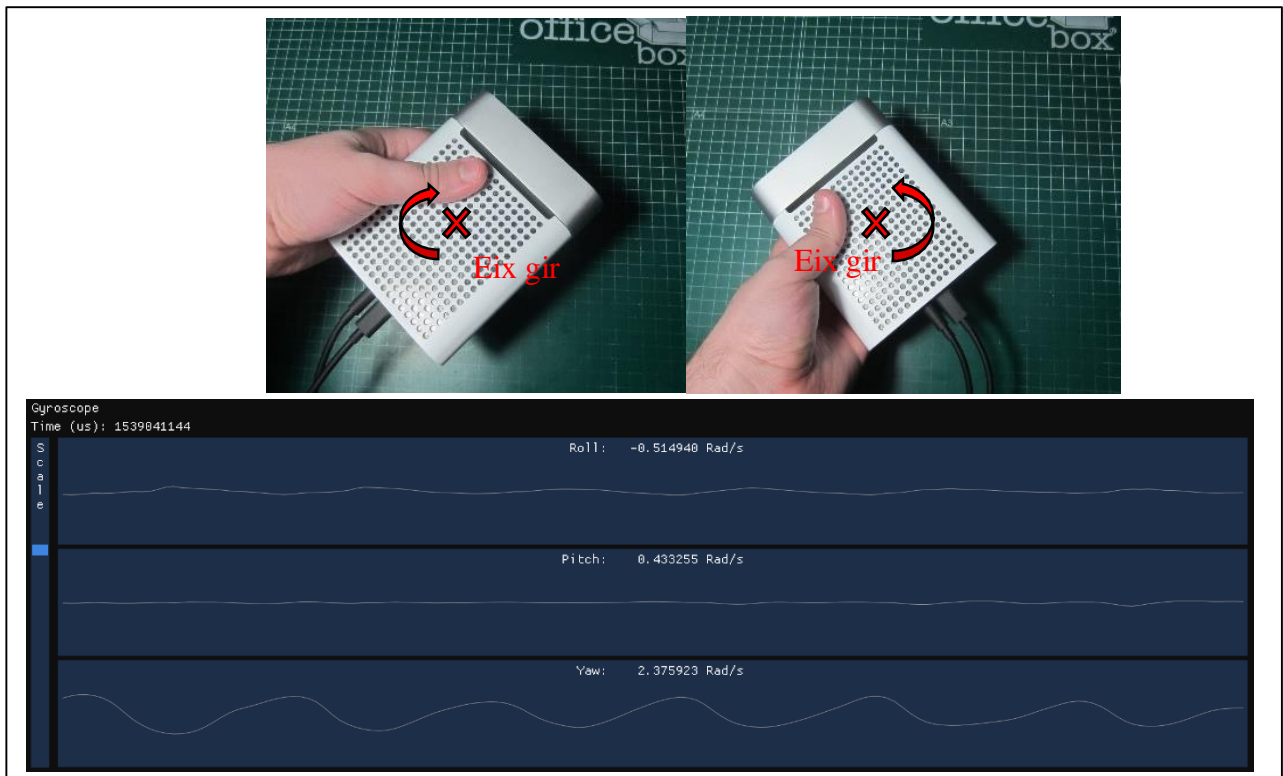
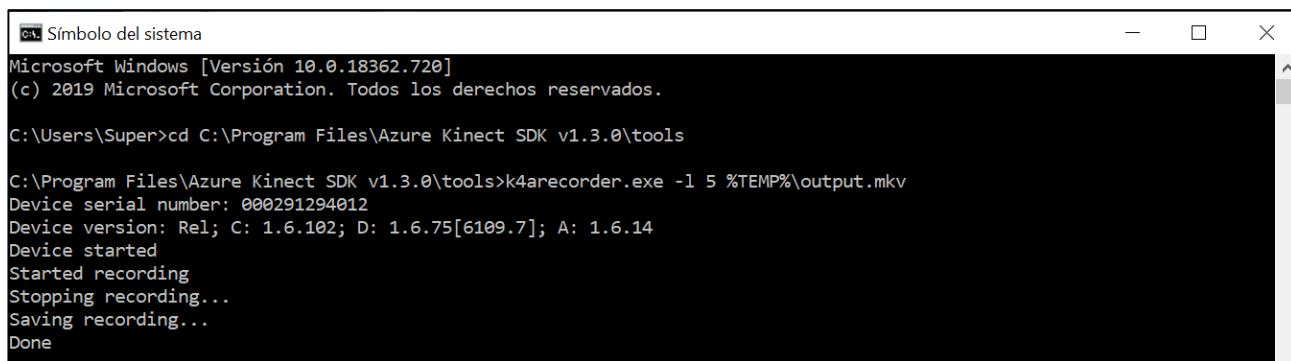


Figura 42 Gràfiques amb gir "yaw".

6.1.4 Primeres captures i gravacions

L'últim pas que s'han realitzat per testejar la càmera i comprovar que tots els components funcionen, consisteix en realitzar captures i gravacions ràpides mitjançant la consola de comandaments de l'ordinador, tal i com indica el fabricant, ja que el visualitzador no permet guardar cap arxiu.

Per exemple, per fer una gravació, és necessari obrir la finestra de la consola de comandaments i fixar el fitxer d'eines contingut en l'aplicació Azure Kinect SDK, la qual s'ha instal·lat juntament amb el visualitzador. En aquesta carpeta d'eines és possible executar l'aplicació "*k4arecorder.exe*", a partir d'una línia de codi on s'indica la configuració amb que es vol llançar aquesta aplicació. Així, per exemple, es pot indicar temps de gravació, configuració de la càmera de color, configuració de la càmera de profunditat, etc. També s'ha d'indicar en quin fitxer es vol guardar l'arxiu resultant i el nom d'aquest. En la **Figura 43** es mostra l'exemple d'unes línies de codi introduïdes en la consola de comandaments per fer una gravació de 5 segons amb la configuració per defecte de la càmera (NFOV Unbbined i la RGB a 1080p i 30 FPS). El fabricant ofereix a la pàgina web més exemples amb configuracions diferents que s'han provat per comprovar que es guardaven captures sense errors.



```
Símbolo del sistema
Microsoft Windows [Versión 10.0.18362.720]
(c) 2019 Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.

C:\Users\Super>cd C:\Program Files\Azure Kinect SDK v1.3.0\tools

C:\Program Files\Azure Kinect SDK v1.3.0\tools>k4arecorder.exe -l 5 %TEMP%\output.mkv
Device serial number: 000291294012
Device version: Rel; C: 1.6.102; D: 1.6.75[6109.7]; A: 1.6.14
Device started
Started recording
Stopping recording...
Saving recording...
Done
```

Figura 43 Consola de comandaments de l'ordinador per a una gravació de 5 segons amb configuració per defecte. L'arxiu resultant es guarda a la carpeta temporal de l'ordinador, amb el nom *output.mkv*.

L'arxiu resultant es pot trobar al directori establert, i aquest arxiu estarà en format ".mkv" el qual és un format que permet que es pugui obrir en el visualitzador i poder tractar la gravació com si fos una captura en temps real. És a dir, es poden visualitzar les lectures de profunditat i totes les opcions possibles, per a qualsevol moment de la gravació, tal com es pot veure en la **Figura 44**.

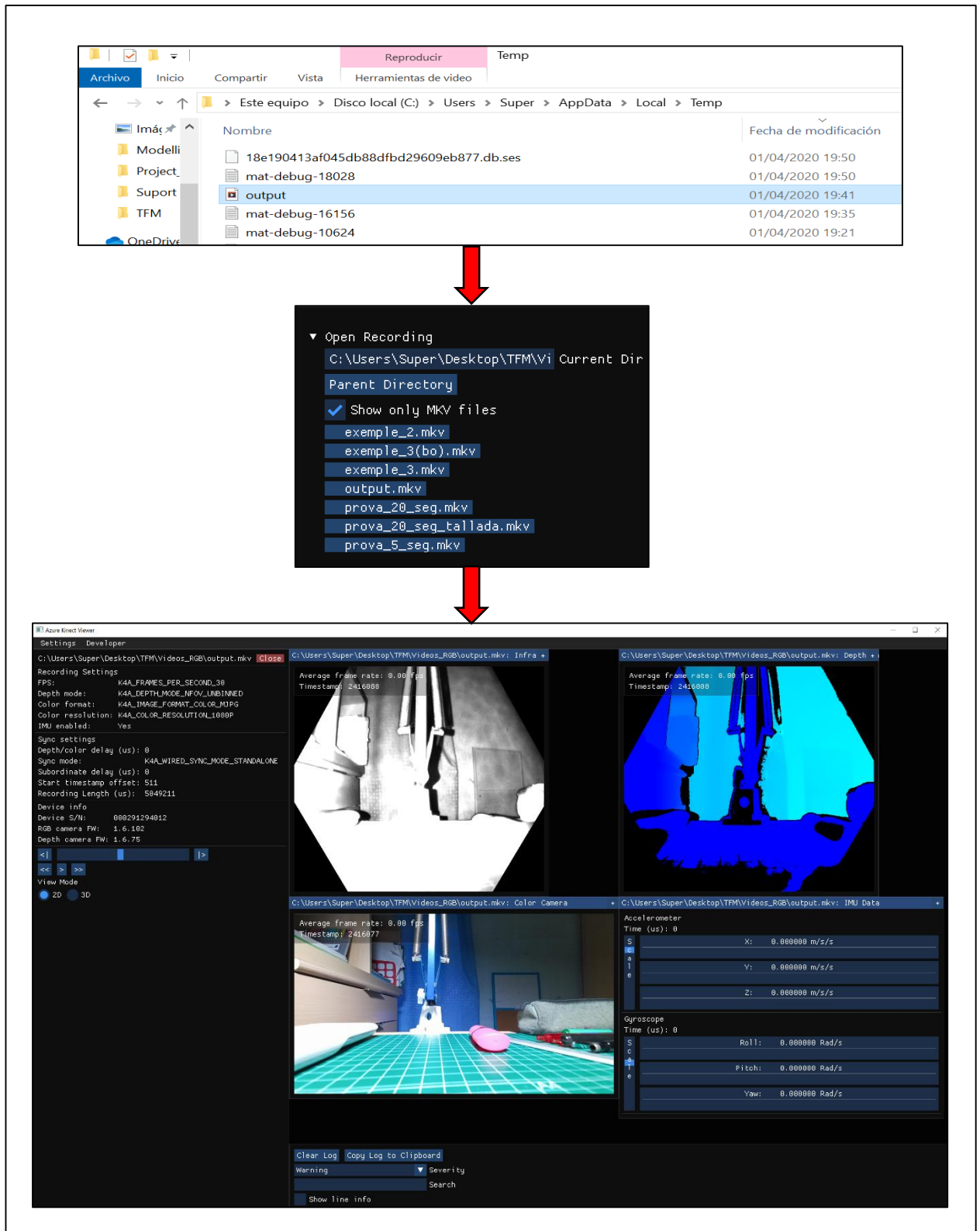


Figura 44 A dalt es pot veure l'arxiu generat en la carpeta temporal de l'ordinador. Al mig es mostra el missatge d'entrada al visualitzador que permet obrir gravacions i captures d'un directori. A baix es veu la finestra del visualitzador amb la gravació oberta, molt semblant a la vista en temps real.

6.2 Programa dissenyat

Com s'ha comentat anteriorment, el visualitzador de la càmera no permet guardar núvols de punts de les captures que es fan, per tant, ha estat necessari dissenyar un programa per poder fer captures i guardar el punt de vista de la càmera de color i de profunditat, així com generar i guardar núvols de punts a partir de les lectures i dades que recull la càmera, i també guardar les lectures de la IMU.

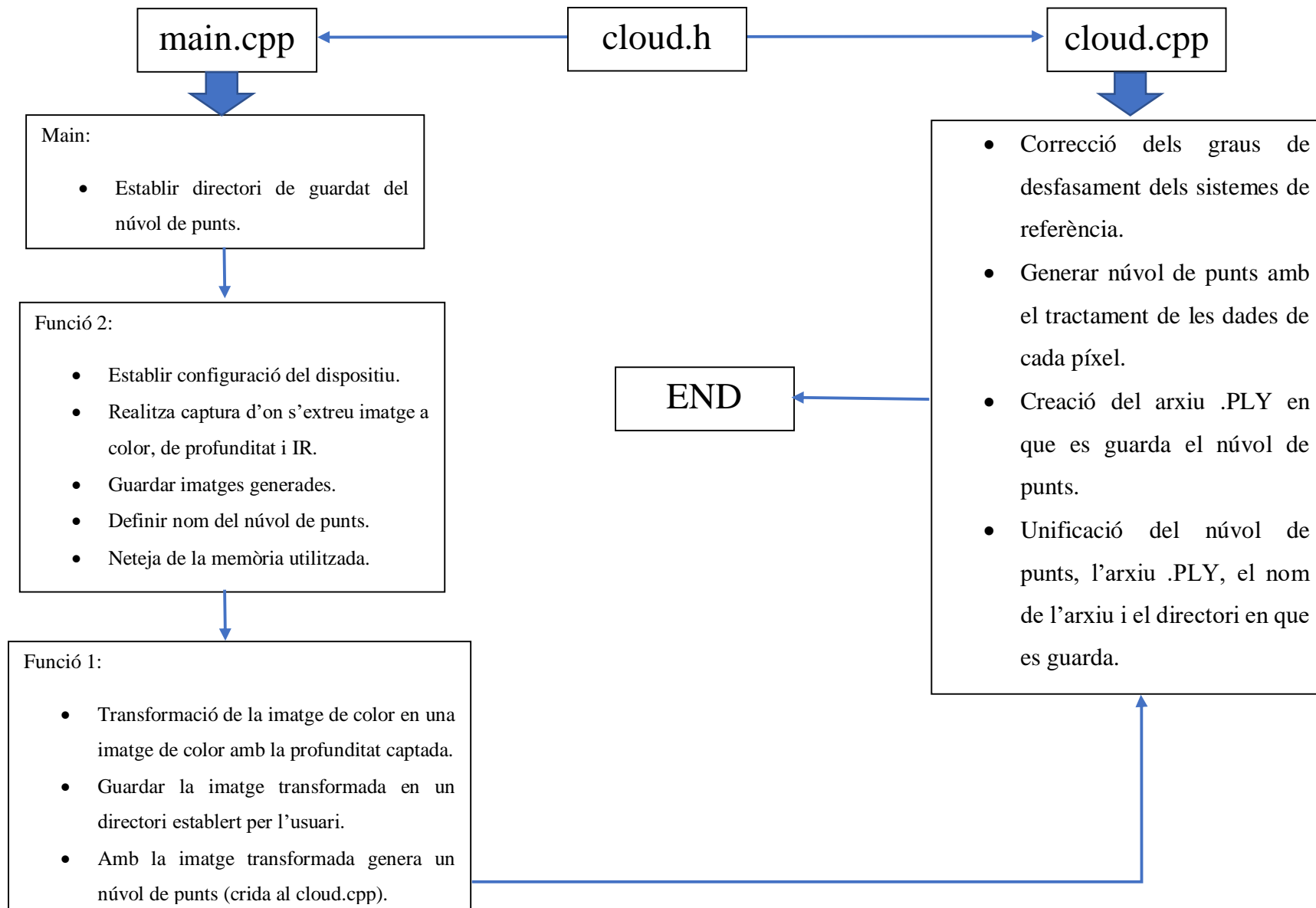
Degut a l'existència de documentació en la pàgina web del fabricant, que recull les diferents funcions que es poden programar de la càmera en llenguatge C/C++ s'ha decidit, que sigui aquest llenguatge l'utilitzat per dissenyar el programa.

També s'ha dit anteriorment que s'ha utilitzat el software Visual Studio 2017 per realitzar la programació. Donat que aquest software pertany a la mateixa empresa fabricant de la càmera, hi ha llibreries del dispositiu que són compatibles amb el Visual Studio i són més fàcils de implementar que amb altres softwares de programació.

En aquest apartat es recull un diagrama de flux i una explicació general del programa que s'ha dissenyat. Abans de veure el diagrama de flux del programa, és necessari comentar un parell de llibreries que són necessàries instal·lar en el Visual Studio, per a que totes les funcions del programa estiguin disponibles:

- Azure Kinect Sensor SDK: Llibreria que conté totes les funcions per poder programar la configuració de la càmera. La seva instal·lació es pot fer directament des del mateix Visual Studio.
- Open CV: Llibreria utilitzada per al tractament de les imatges. Permet llegir, mostrar i guardar les imatges capturades amb la càmera. La seva instal·lació s'ha de fer a l'ordinador i posteriorment introduir-la al projecte de Visual Studio on es té el programa dissenyat per controlar la càmera.

En la següent pàgina es mostra un diagrama de flux del programa. Es mostren els passos que es segueixen per configurar la càmera des del programa i de com es fan les captures i es tracten a través de diferents funcions per transformar-les en arxius que es guarden en directoris, així com també es transforma la informació de profunditat i color en núvols de punts.



El programa dissenyat està format per un programa principal (main.cpp) i una subrutina (cloud.cpp) que es connecten mitjançant una capçalera (cloud.h).

El programa principal està dividit en tres parts: main, funció 1 i funció 2. Cal recordar que el software utilitzat per escriure el codi (Visual Studio) no fa una execució de cada línia de codi de forma ordenada, sinó que segons les variables d'entrada que s'han designat per cada funció, moltes de les variables entren i surten de cada funció segons es necessiti, per tant, tot i haver fet un diagrama de flux bastant lineal, realment hi ha un moviment d'informació més complex dintre del programa. El diagrama de flux dibuixat, únicament serveix per tenir una idea general del programa dissenyat i veure els punts més importants.

- Main: Únicament serveix per introduir el directori en que es vol guardar el núvol de punts, el qual s'entra en la funció 2.
- Funció 2: Primerament detecta el número de càmeres connectades i el número de sèrie de cadascuna a partir de diferents funcions de la llibreria de la Azure Kinect (com en aquest estudi només es disposa de una càmera, doncs únicament s'ha preparat el programa per treballar amb una, en cas de voler connectar diverses s'ha d'afegir un procés de sincronisme de les càmeres).

Aquesta funció 2 també permet establir la configuració que es vol per poder fer la captura amb la càmera (com s'ha explicat, de moment no es faran gravacions, únicament generar núvols de punts a partir de captures). Així doncs, amb diferents funcions de la llibreria de la càmera, es possible establir quina resolució, FPS i format de color es vol per a la càmera de color, i quin mode es vol per a la càmera de profunditat. A partir de la captura realitzada amb la configuració desitjada, la funció 2 permet extreure la imatge de color, de profunditat i IR corresponents, i guardar-les en un directori designat per l'usuari. La funció també es capaç de imprimir per pantalla i guardar en variables les lectures de la IMU en el moment que s'ha fet la captura.

La última aplicació d'aquesta funció és la de definir el nom del núvol de punts (que s'ha de fer de manera diferent segons el sistema operatiu de l'ordinador) i eliminar els llocs de memòria i les variables ocupades per informació que ja no és necessària, d'aquesta manera es busca agilitzar el càlcul computacional al executar el programa.

- **Funció 1:** La majoria de variables generades en la funció 2 acaben entrant en aquesta funció 1 per poder realitzar diferents operacions. Primerament genera dues transformacions, una que consisteix en fusionar les imatges de color i profunditat, per crear una imatge a color amb la geometria detectada per la càmera de profunditat (la qual es guardada en un directori triat per l'usuari), i l'altra per transformar la imatge de profunditat en un espai per guardar el núvol de punts. Amb aquestes dues transformacions, la funció crida a la subrutina "cloud.cpp" per generar el núvol de punts.

Aquesta subrutina està estructurada de manera que es generin vectors que continguin en cada espai una dada d'informació d'un píxel determinat, com podria ser posició $[x,y,z]$, composició de colors RGB, intensitat i rang de correcció de la intensitat^[3]. A més, també permet fer la correcció de l'angle dels sistemes de referència dels modes de profunditat^[4], així com adequar tota la informació per poder-la guardar en un arxiu .PLY on cada línia de l'arxiu conté tota la informació desitjada d'un píxel. D'aquesta manera, cada píxel queda definit com un punt, de tal forma que el conjunt de punts forma un núvol de punts que queda guardat en l'arxiu .PLY.

Finalment, s'encarrega d'unificar el arxiu .PLY generat, amb el directori del núvol de punts introduït per l'usuari en el "main" del programa principal, i amb el nom del núvol de punts establert per l'usuari en la "Funció 2" del programa principal.

És important puntualitzar que aquest programa està enfocat a utilitzar-lo únicament amb la Azure Kinect. La Kinect V2 ja disposa del seu propi programa per fer captures i generar núvols de punts que es va ser dissenyat pel grup de recerca en un estudi previ a aquest.

[3] La intensitat i rang de correcció de la intensitat són dades importants de cada punt per poder detectar errors a l'hora de visualitzar el núvol en el CloudCompare. Que són i en que es basen aquests conceptes, s'han recollit en l'apartat "6.3 Calibratge de la càmera" ja que són paràmetres que s'han incorporat al codi després d'haver realitzat algunes proves i assajos.

[4] La manera en que s'ha corregit el desfasament entre els sistemes de referència es recull en l'apartat "6.3 Calibratge de la càmera". Com s'ha vist anteriorment els modes de profunditat tenen un sistema de referència desfasat un cert angle respecte el sistema de referència de la càmera de color, per tant ha estat necessari realitzar una sèrie de proves i assajos fins ajustar i calibrar els sistemes de referència.

6.3 Calibratge de la càmera

En aquest apartat es recullen les diferents consideracions que s'han tingut en compte i processos seguits per calibrar la Azure Kinect i deixar-la preparada per la realització dels assajos.

6.3.1 Invalidació de píxels

Una de les consideracions a tenir en compte al calibrar la càmera, és l'existència de píxels que són invalidats. En certes situacions la càmera de profunditat pot ser que no ofereixi valors correctes per a certs píxels d'una captura. En aquestes situacions els píxels de les captures de profunditat són invalidats. Aquests píxels invalidats són indicats en negre i presenten un valor de profunditat de 0. La invalidació de píxels pot ser deguda a diversos motius:

- Píxels fora del rang de la “màscara d'il·luminació”: El rang que pot escombrar la càmera de profunditat segons el mode és limitat. Aquest rang que pot cobrir amb els rajos IR, s'anomena “màscara d'il·luminació”. El píxels que queden fora d'aquest rang són invalidats per la càmera ja que corresponen a zones on no es pot irradiar amb rajos IR i, per tant, no es pot conèixer la seva posició en l'espai. En la **Figura 45**, es pot veure que els píxels invalidats per estar fora de la màscara d'il·luminació per al mode NFOV (ja sigui Unbinned o 2x2 Binned) corresponen als píxels negres que limiten la imatge amb forma d'hexàgon, mentre que per al mode WFOV (ja sigui Unbinned o 2x2 Binned) corresponen als píxels negres que delimiten la imatge en forma de cercle.

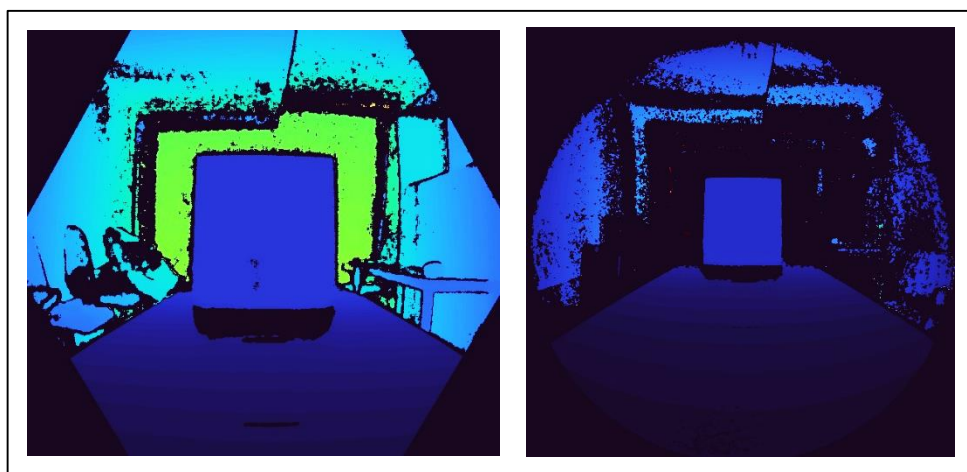


Figura 45 Esquerra: Captura en mode NFOV. Dreta: Captura en mode WFOV.

- Píxels amb saturació del raig IR: Quan certs píxels reben una excessiva radiació de IR es saturen i es perd la seva informació. Quan això succeeix, la càmera els invalida i en el seu lloc col·loca píxels negres. En la **Figura 46** es mostra una captura feta a un taulell d'un joc de taula on s'indica amb un cercle vermell una invalidació de píxels deguda a una saturació de la senyal IR ja que el taulell es troba molt proper a la càmera i es concentren molts rajos IR que surten de l'emissor IR de la càmera i són reflectits immediatament pel taulell.

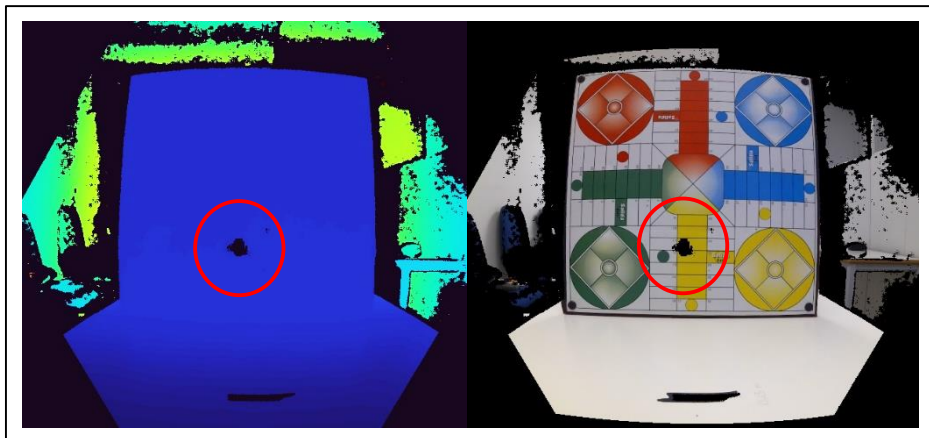


Figura 46 Esquerra: Captura de profunditat en mode NFOV. Dreta: Captura que fusiona imatge de color i profunditat.

- Píxels amb poca intensitat del raig IR: És el cas contrari a la invalidació per saturació. Quan el raig IR arriba tan dèbil a un punt, que no es possible obtenir la informació de profunditat, la càmera invalida els píxels corresponents. En la **Figura 47** es pot veure indicat amb fletxes vermelles, la invalidació de píxels del fons de la captura, on els rajos IR arriben dèbilment i no es possible captar-los.

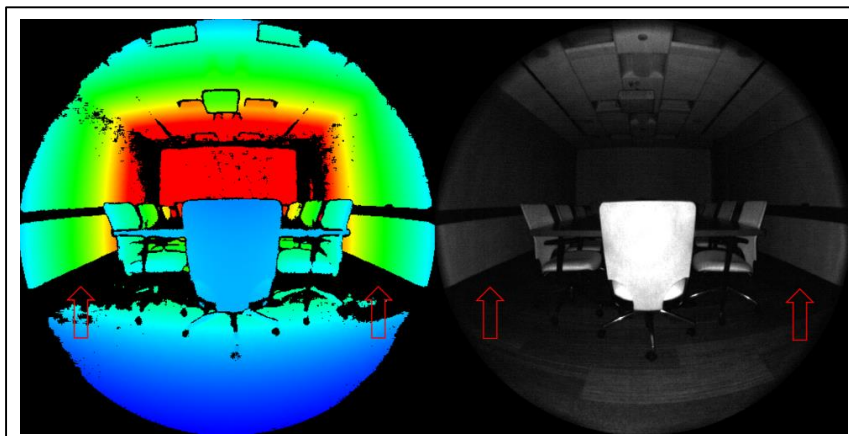


Figura 47 Esquerra: Captura de profunditat en mode WFOV. Dreta: Captura IR (Font: Microsoft).

- **Profunditat ambigua:** Els píxels es poden invalidar si la càmera rep senyals ambigües del objectes en escena. Un situació comú d'aquest cas, és la invalidació de les cantonades d'una habitació. Degut a la geometria on es té una convergència de dos parets o més, els raigs IR emesos per la càmera, es reflecteixen d'una paret a una altra, lo qual causa ambigüitat al no saber a quina paret correspon el píxel. La càmera disposa d'un algoritme de filtrat que detecta aquestes senyals ambigües i invalida els píxels corresponents. En la **Figura 48** es mostra un exemple de la invalidació de píxels que es troben en una cantonada, degut a la profunditat ambigua. També es pot veure que aquesta invalidació és molt variable, ja que per un petit canvi en l'orientació de la càmera, els píxels ja no queden invalidats.

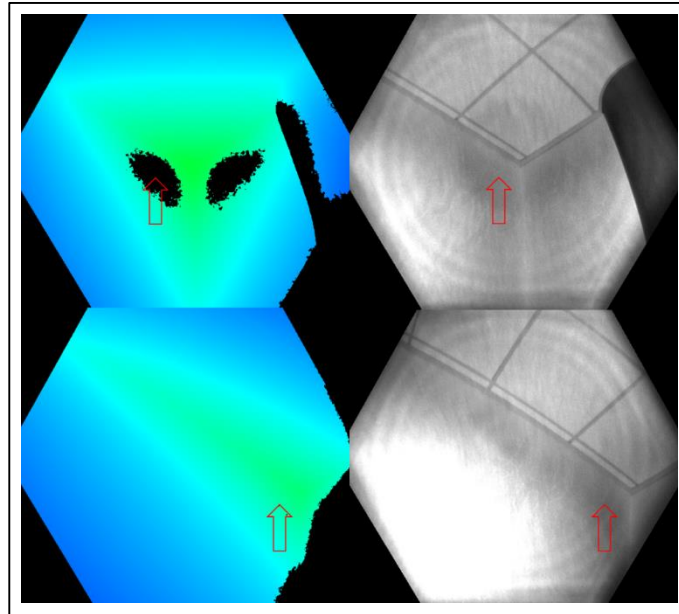


Figura 48 A dalt: Invalidació de píxels en una cantonada. A baix: Mateixos píxels que imatge de a dalt, però sense invalidació, degut al canvi en l'orientació de la càmera (Font: Microsoft).

- **“Mixed pixels”:** Invalidació de píxels que es troben en el contorn dels objecte que es capturen. La diferència de distància entre un píxel que es troba just en el cantell d'un objecte enfront de la càmera, i el seus píxels veïns que corresponen al fons de la captura, fa que la càmera rebi senyals confoses, i l'algoritme intern de la càmera decideix invalidar aquests píxels del contorn. Aquest efecte s'ha manifestat especialment en aquest estudi, per tant es tractaran amb més detall en el següent apartat els diferents problemes que s'han detectat relacionats amb els *mixed pixels*.

6.3.2 Mixed píxels

Al llarg dels assajos realitzats tant a l'interior com a l'exterior s'han observat problemes relacionats amb el fenomen dels *mixed pixels* al obrir els núvols de punts de les captures realitzades, en el CloudCompare. Per als assajos, s'ha utilitzat com a blanc un taulell d'escacs ja que gràcies a la seva distribució de caselles clares i fosques facilita el prendre mesures sobre el núvol de punts generat. L'efecte dels *mixed pixels* no afecta a la part central del taulell d'escacs (on es té la quadrícula de caselles), per tant no suposa un problema per fer els assajos, però si que s'ha apreciat que a mesura que s'augmenta la distància del taulell respecte de la càmera, en les cantonades del taulell cada cop desapareixen més píxels, i això per a treballs futurs pot suposar un problema (**Figura 49**).

Donat que aquesta invalidació de píxels es produïda degut a un filtre intern de la càmera, es va contactar amb el suport tècnic de Microsoft per tal de buscar alguna solució. Finalment es va arribar a la conclusió de que el filtre intern de la càmera no podia ser configurat per part de l'usuari, per tant com a única solució es va recomanar que es provés amb un altre blanc de material diferent al taulell d'escacs i a una distància més reduïda, de manera que l'efecte dels *mixed pixels* es reduís.

Dit això, es va decidir utilitzar com a nou blanc un cartró de les mateixes dimensions que el taulell. El cartró té una superfície més mate que no pas el taulell d'escacs que al ser de plàstic és una superfície setinada. Tot i això, als núvols de punts obtinguts no s'observa una gran millora en quant als problemes de *mixed pixels* (**Figura 49**), per tant només queda recomanar per a futurs treballs en que s'utilitzi la càmera, intentar realitzar les captures en les millor condicions que es pugui, per tal de reduir al màxim aquest efecte dels *mixed pixels*.

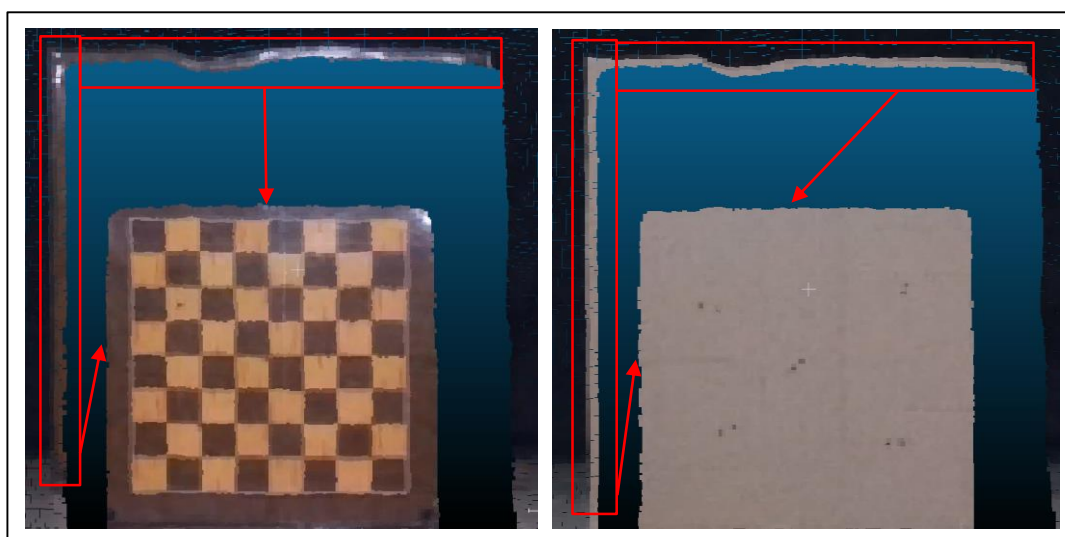


Figura 49 Esquerra: Captura del taulell d'escacs. Dreta: Captura del cartró. En vermell s'indica l'efecte dels *mixed pixels*.

6.3.3 Errors de la càmera

Segons el fabricant, al realitzar les captures la càmera comet dos tipus d'error que s'han de considerar: l'error sistemàtic i l'error aleatori.

- Error sistemàtic: La càmera disposa d'algoritmes capaços de filtrar el soroll visual que es produeix en una captura, que fa perdre resolució i esborrona la imatge. Es computa una mitja de temps amb una sèrie de fotogrames d'una imatge estàtica, per tal d'eliminar el soroll al màxim possible. Així doncs, l'error sistemàtic es defineix com la diferència entre la profunditat mesurada després d'eliminar el soroll, i la profunditat real que s'hauria de tenir. D'acord al fabricant, aquest error correspon a l'expressió (4).

$$E_{systematic} = \frac{\sum_{t=1}^N d_t}{N} - d_{gt} \quad (4)$$

On d_t correspon a la mesura de la profunditat en un temps t , N és el número de fotogrames utilitzats en el procés de fer la mitja, i d_{gt} és la profunditat real (el que el fabricant anomena com a “*ground truth depth*”).

- Error aleatori: Si per exemple es prenen 100 imatges d'un mateix objecte sense moure la càmera, la profunditat registrada de l'objecte en les 100 imatges no serà sempre igual, hi hauran petites diferències. Aquestes variacions són degudes a que el fabricant anomena com “*shot noise*”. El “*shot noise*” és en número de fotons impactant al sensor de profunditat per un factor aleatori al llarg del temps. Aquest error aleatori en una imatge estàtica es defineix com una desviació estàndard de la profunditat al llarg del temps, i es computa d'acord a l'expressió (5).

$$E_{aleatori} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N (d_t - \bar{d})^2}{N}} \quad (5)$$

On N correspon al número de mesures de profunditat realitzades, d_t és la mesura de profunditat al temps t , i \bar{d} és el valor mitjà computat per a totes les mesures de profunditat d_t . Aquest error aleatori té molta similitud amb el càlcul de precisió de la càmera que s'ha fet en aquest estudi^[5], ja que pels dos casos es fa una desviació estàndard de les mostres obtingudes d'una sèrie de repeticions. Tot i això, l'expressió utilitzada en l'estudi de precisió és diferent.

[5] Veure apartat “7.3 Exactitud i precisió”.

6.3.4 Rangs de la càmera de profunditat

Com s'ha explicat anteriorment, la càmera de profunditat disposa de diferents modes. Tal i com es mostra en la **Figura 50**, cada mode accepta una certa configuració i té un rang d'operació determinat. Així doncs els modes WFOV estan pensats per la curta distància a canvi de tenir un camp de visió ampli, en canvi els modes NFOV estan dissenyats per mitjana i llarga distància, amb un camp de visió més reduït (veure **Figura 51**).

Mode	Resolution	FoI	FPS	Operating range*	Exposure time
NFOV unbinned	640x576	75°x65°	0, 5, 15, 30	0.5 - 3.86 m	12.8 ms
NFOV 2x2 binned (SW)	320x288	75°x65°	0, 5, 15, 30	0.5 - 5.46 m	12.8 ms
WFOV 2x2 binned	512x512	120°x120°	0, 5, 15, 30	0.25 - 2.88 m	12.8 ms
WFOV unbinned	1024x1024	120°x120°	0, 5, 15	0.25 - 2.21 m	20.3 ms
Passive IR	1024x1024	N/A	0, 5, 15, 30	N/A	1.6 ms

Figura 50 Configuracions de la càmera de profunditat facilitades pel fabricant (Font: Microsoft).

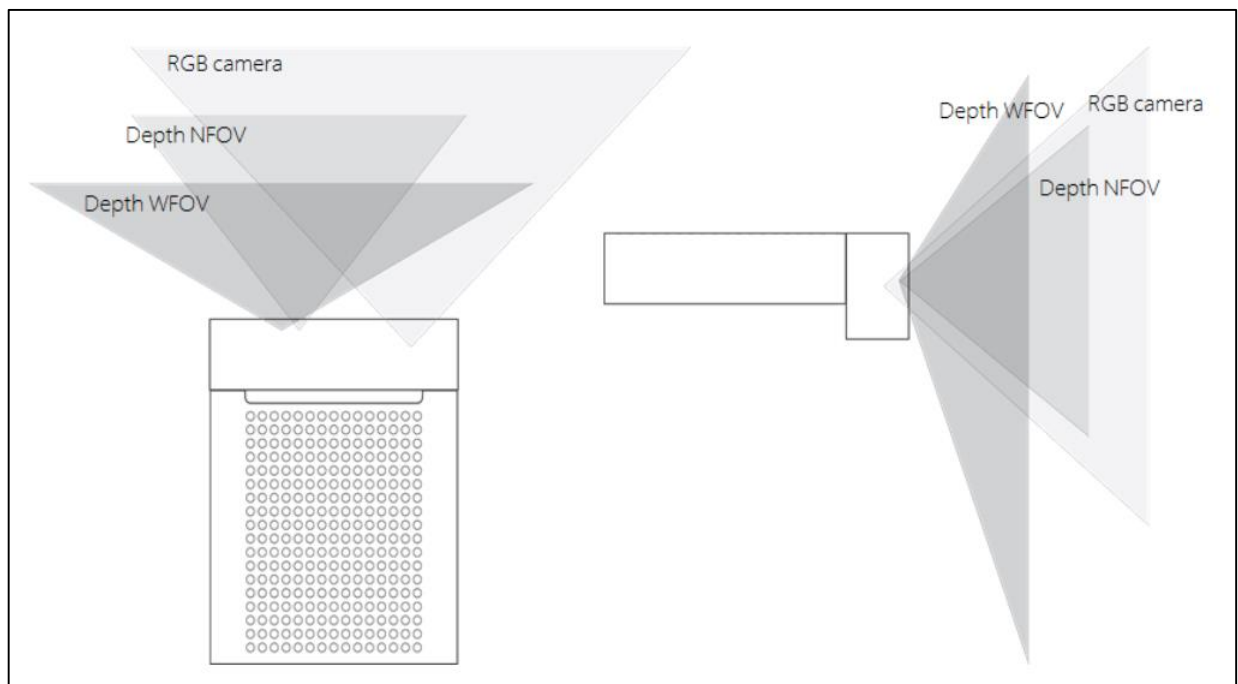


Figura 51 Esquematització del rang de la càmera de color i profunditat, facilitada pel fabricant (Font: Microsoft).

El fabricant ofereix un rang d'operació dels modes de profunditat orientatius, ja que l'entorn i les condicions afecten de gran manera al dispositiu. Per tant, un procés important en el calibratge de la càmera, és el de determinar el comportament de la càmera amb l'increment de la distància d'allò que s'està capturant. Dit d'una altra manera, comprovar que el rang proporcionat pel fabricant, és el mateix per als assajos que es volen realitzar en aquest estudi, o si existeixen distàncies a les que no es pot arribar o s'arriba amb poca precisió, per tal de descartar-les en els assajos.

Seguint el mateix procés descrit en l'assaig d'interior^[6], s'han utilitzat tres blancs diferents per testejar el rang dels diferents modes de la càmera, abans de fer els assajos, per tal de comprovar que estigui ben calibrada. Així doncs dels tres blancs que es mostren en la **Figura 52, 53 i 54**, s'han anat mirant a diferents distàncies (corresponents als rangs indicats pel fabricant) les coordenades dels punts marcats i certes longituds entre punts, per tal de comparar-les amb les mesures reals i veure l'error que es comet. Cal dir que al software dissenyat, ja s'ha incorporat la correcció del desfasament dels angles per cada mode de profunditat, amb el valor que indicava el fabricant.

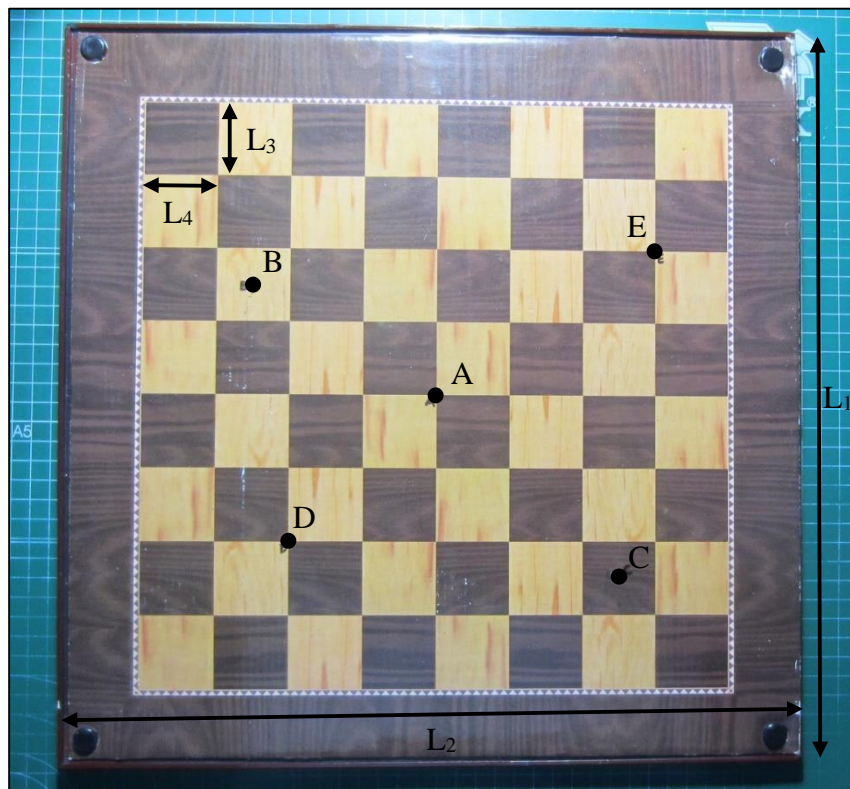


Figura 52 Blanc 1: Taulell d'escacs on s'han estudiat les coordenades x , y i z dels punts A, B, C, D, i E, així com les longituds L_1 , L_2 , L_3 i L_4 .

[6] Veure "7. Avaluació experimental en condicions d'interior", per entendre com ha sigut el procés per obtenir les taules amb els errors entre les mesures reals i les obtingudes de la càmera, que s'ha utilitzat en aquest apartat de calibratge.

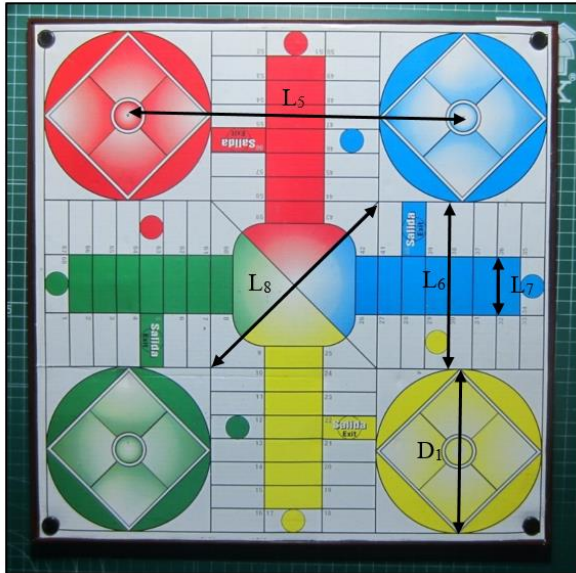


Figura 53 Blanc 2: Taulell de joc de taula, on s'han estudiat les longituds L_5 , L_6 , L_7 i L_8 i D_1 .

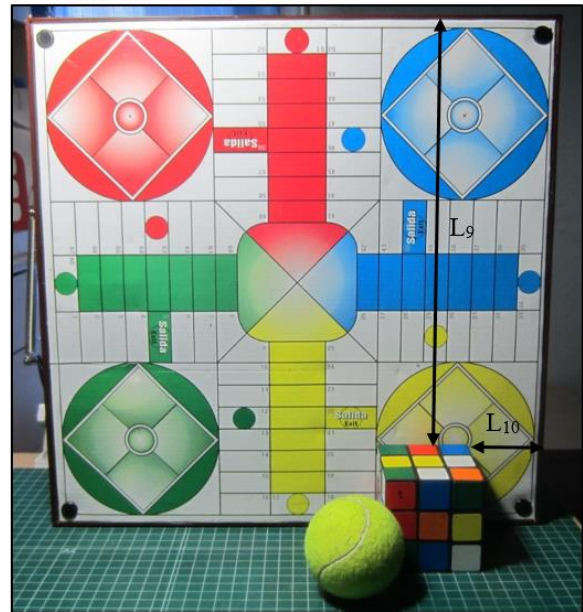


Figura 54 Blanc 3: Taulell de joc de taula, cub i esfera on s'han estudiat les longituds L_9 i L_{10} .

Establerts els elements que es volen estudiar de cada blanc, es fan les captures i s'obtenen les següents taules de resultats (**Taules 2-13**), cal aclarir de les taules, que les distàncies indicades en verd són distàncies dintre del rang segons el fabricant, mentre que les vermelles són fora del rang; a més les caselles que contenen N/A són corresponents a dades que no s'han pogut obtenir per falta de resolució o per limitació de rang de cada mode utilitzat. Les taules expandides es poden consultar en els Annexes d'aquest estudi).

Taula 2 Resultats del blanc 1 per al mode NFOV Unbinned.

Distància al blanc 1		Azure Kinect (NFOV Unbinned)																		
		A			B			C			D			E			L1	L2	L3	L4
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z				
0,25 m	Error (mm)	1	10	18	0	12	15	0	4	18	3	8	17	5	10	16	N/A	N/A	1	0
0,5 m	Error (mm)	1	17	11	1	18	10	1	11	14	3	13	12	2	16	10	8	1	1	0
1,00 m	Error (mm)	2	24	20	0	26	20	2	20	21	4	22	20	2	24	23	11	0	5	0
2,21 m	Error (mm)	5	47	4	2	52	5	3	42	20	5	44	6	1	49	2	30	1	7	7
2,88 m	Error (mm)	1	59	22	4	62	21	4	53	27	6	63	16	2	61	26	N/A	13	2	2
3,86 m	Error (mm)	1	81	6	6	85	7	4	80	14	10	83	6	1	84	0	N/A	20	8	0
5,36 m	Error (mm)	23	119	39	23	115	42	23	105	26	32	116	30	20	108	44	12	10	6	6

Taula 3 Resultats del blanc 2 per al mode NFOV Unbinned

Distància al blanc 2		Azure Kinect (NFOV Unbinned)				
		L5	L6	L7	L8	D1
0,25 m	Error (mm)	9	N/A	3	4	4
0,5 m	Error (mm)	8	3	4	1	1
1,00 m	Error (mm)	6	2	1	4	7
2,21 m	Error (mm)	2	0	5	7	3
2,88 m	Error (mm)	1	6	0	7	1
3,86 m	Error (mm)	5	5	6	N/A	5
5,36 m	Error (mm)	3	7	8	N/A	7

Taula 4 Resultats del blanc 3 per al mode NFOV Unbinned.

Distància al blanc 3		Azure Kinect (NFOV Unbinned)	
		L9	L10
0,25 m	Error (mm)	N/A	N/A
0,5 m	Error (mm)	0	9
1,00 m	Error (mm)	0	1
2,21 m	Error (mm)	3	0
2,88 m	Error (mm)	N/A	N/A
3,86 m	Error (mm)	N/A	N/A
5,36 m	Error (mm)	N/A	N/A



Taula 5 Resultats del blanc 1 per al mode NFOV 2x2 Binned.

Distància al blanc 1		Azure Kinect (NFOV 2x2 Binned)																		
		A			B			C			D			E			L1	L2	L3	L4
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z				
0,25 m	Error (mm)	2	7	26	5	8	30	0	3	19	1	4	29	5	6	20	N/A	N/A	1	1
0,5 m	Error (mm)	0	10	14	2	14	13	1	6	19	1	6	20	4	10	9	5	1	1	1
1,00 m	Error (mm)	9	10	26	9	13	28	3	5	25	2	9	30	11	12	22	10	1	1	0
2,21 m	Error (mm)	10	18	13	8	16	10	12	13	17	6	11	16	21	15	7	N/A	8	10	12
2,88 m	Error (mm)	13	16	26	16	18	28	10	15	23	8	19	27	16	23	20	N/A	12	14	14
3,86 m	Error (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
5,36 m	Error (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	19	20	N/A	N/A

Taula 6 Resultats del blanc 2 per al mode NFOV 2x2 Binned.

Distància al blanc 2		Azure Kinect (NFOV 2x2 Binned)				
		L5	L6	L7	L8	D1
0,25 m	Error (mm)	N/A	N/A	2	3	2
0,5 m	Error (mm)	3	1	1	0	1
1,00 m	Error (mm)	7	7	1	0	1
2,21 m	Error (mm)	8	N/A	4	N/A	5
2,88 m	Error (mm)	2	N/A	5	N/A	17
3,86 m	Error (mm)	N/A	N/A	9	N/A	N/A
5,36 m	Error (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Taula 7 Resultats del blanc 3 per al mode NFOV 2x2 Binned.

Distància al blanc 3		Azure Kinect (NFOV 2x2 Binned)	
		L9	L10
0,25 m	Error (mm)	N/A	N/A
0,5 m	Error (mm)	6	11
1,00 m	Error (mm)	2	7
2,21 m	Error (mm)	3	N/A
2,88 m	Error (mm)	N/A	N/A
3,86 m	Error (mm)	N/A	N/A
5,36 m	Error (mm)	N/A	N/A



Taula 8 Resultats del blanc 1 per al mode WFOV Unbinned.

Distància al blanc 1		Azure Kinect (WFOV Unbinned)																		
		A			B			C			D			E			L1	L2	L3	L4
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z				
0,25 m	Error (mm)	1	1	35	1	5	38	1	5	28	4	3	38	6	2	24	N/A	9	2	3
0,5 m	Error (mm)	1	3	21	0	3	21	2	8	21	4	6	23	5	0	16	2	8	0	0
1,00 m	Error (mm)	6	11	29	8	11	31	6	13	22	4	13	28	10	11	25	19	15	4	1
2,21 m	Error (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
2,88 m	Error (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
3,86 m	Error (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
5,36 m	Error (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Taula 9 Resultats del blanc 2 per al mode WFOV Unbinned.

Distància al blanc 2		Azure Kinect (WFOV Unbinned)				
		L5	L6	L7	L8	D1
0,25 m	Error (mm)	14	4	3	8	2
0,5 m	Error (mm)	9	2	1	8	2
1,00 m	Error (mm)	8	2	1	3	1
2,21 m	Error (mm)	9	N/A	3	N/A	0
2,88 m	Error (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
3,86 m	Error (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
5,36 m	Error (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Taula 10 Resultats del blanc 3 per al mode WFOV Unbinned.

Distància al blanc 3		Azure Kinect (WFOV Unbinned)	
		L9	L10
0,25 m	Error (mm)	N/A	N/A
0,5 m	Error (mm)	16	9
1,00 m	Error (mm)	6	4
2,21 m	Error (mm)	N/A	N/A
2,88 m	Error (mm)	N/A	N/A
3,86 m	Error (mm)	N/A	N/A
5,36 m	Error (mm)	N/A	N/A



Taula 11 Resultats del blanc 1 per al mode WFOV 2x2 Binned.

Distància al blanc 1		Azure Kinect (WFOV 2x2 Binned)																		
		A			B			C			D			E			L1	L2	L3	L4
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z				
0,25 m	Error (mm)	1	0	36	0	3	38	2	5	28	5	3	39	5	1	25	N/A	8	2	0
0,5 m	Error (mm)	2	1	21	1	0	22	1	9	21	2	8	25	4	2	18	0	4	2	3
1,00 m	Error (mm)	5	13	28	9	9	32	3	19	23	2	14	30	7	11	24	20	25	5	4
2,21 m	Error (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
2,88 m	Error (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
3,86 m	Error (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
5,36 m	Error (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Taula 12 Resultats del blanc 2 per al mode WFOV 2x2 Binned.

Distància al blanc 2		Azure Kinect (WFOV 2x2 Binned)				
		L5	L6	L7	L8	D1
0,25 m	Error (mm)	13	1	0	9	4
0,5 m	Error (mm)	8	2	0	8	3
1,00 m	Error (mm)	8	3	2	0	1
2,21 m	Error (mm)	2	N/A	3	N/A	5
2,88 m	Error (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
3,86 m	Error (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
5,36 m	Error (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Taula 13 Resultats del blanc 3 per al mode WFOV 2x2 Binned.

Distància al blanc 3		Azure Kinect (WFOV 2x2 Binned)	
		L9	L10
0,25 m	Error (mm)	N/A	N/A
0,5 m	Error (mm)	13	3
1,00 m	Error (mm)	0	3
2,21 m	Error (mm)	N/A	N/A
2,88 m	Error (mm)	N/A	N/A
3,86 m	Error (mm)	N/A	N/A
5,36 m	Error (mm)	N/A	N/A

Vistes aquestes taules es van poder extreure les següents conclusions en quant als rangs de la càmera obtinguts, respecte els que proporciona el fabricant:

- El mode **NFOV Unbinned** permet arribar a distàncies fora del rang indicat pel fabricant. Permet obtenir les coordenades de manera clara dels punts estudiats, així com la majoria de les distàncies tant pel blanc 1 com pel 2 (**Taules 2 i 3**). Cal remarcar que no ha sigut possible mesurar l'alçada del blanc (mesura L1) a distàncies de 2,88 i 3,86 m i en canvi, sí que s'ha mesurat a 5,86 m. Aquest resultat, que pot semblar sorprenent, és degut a que en aquesta darrera distància, el blanc es va col·locar tocant a una paret de fons, fet que evitava l'efecte *mixed pixels* i permetia visualitzar el taulell completament. Pel blanc 3 (**Taula 4**), es mostra que com major és la distància, més difícil és obtenir mesures en un blanc amb diferents objectes superposats. Encara així és el mode que obté millors resultats en general, i això fa que sigui un dels modes que s'estudiaran en l'assaig d'interior.
- Segons el fabricant, el mode **NFOV 2x2 Binned** té major rang que el mode Unbinned, però com és pot veure en les **Taules 5, 6 i 7**, la pèrdua de resolució és tan gran que fa que sigui impossible prendre mesures dels punts. Pel blanc 1 i 2 per distàncies curtes i mitjanes encara és possible obtenir resultats, però per distàncies llargues ja és més difícil. Igual que en el mode NFOV Unbinned, també s'observa l'efecte *mixed pixels* en les mesures L1 i L2. On més s'accentua això, és amb el blanc 3 on la pèrdua de resolució juntament amb un blanc amb objectes superposats, fa que es compliqui molt la presa de mesures. Vist tot això, s'ha decidit descartar aquest mode per l'assaig d'interior ja que utilitza el mateix mode de profunditat que el NFOV Unbinned, però amb pitjor resolució, i amb pitjors resultats.
- Amb el mode **WFOV Unbinned** s'arriba a un rang inferior del que indica el fabricant, tal com es veu en les **Taules 8, 9 i 10**. Per distàncies superiors a 1 m ja es fa molt difícil poder prendre mesures. Era l'esperat, ja que aquest mode està pensat per distàncies curtes i mitjanes. S'ha de destacar que sí que s'obtenen resultats molt constants en el sentit de que a mateixa distància els diferents punts tenen un error similar. Per tant, s'ha decidit que aquest mode també s'estudiarà en l'assaig d'interior ja que pot ser interessant degut a la seva consistència en els resultats.

- Segons el fabricant, el mode **WFOV 2x2 Binned** té un rang major al Unbinned a canvi de perdre resolució. Tot i això, tal com es mostra en les *Taules 11, 12 i 13*, s'han pogut obtenir només resultats fins al mateix rang que el WFOV Unbinned, i a més resultats molt propers a aquest mode. Per tant, s'ha decidit descartar aquets mode per l'assaig d'interior, ja que els resultats obtinguts han sigut iguals que el mode WFOV Unbinned però amb menor resolució.
- Els modes 2x2 Binned podria ser factible d'utilitzar-los o almenys estudiar-los en l'assaig d'interior si, al treballar amb menor resolució, acceleressin el procés de còmput del núvol de punts amb el programa dissenyat. Però s'ha comprovat que cap dels modes 2x2 Binned és més ràpid en l'obtenció del núvol de punts, que el seu corresponent mode Unbinned, per tant, aquest és un altre motiu per descartar el seu ús en aquest estudi.

6.3.5 Correcció de l'angle dels sistemes de referència

Vistos els resultats de les *Taules 2-13* de l'apartat anterior, s'ha pogut comprovar que en tots els modes s'observa que els errors obtinguts tendeixen a ser lineals amb la distància en certes coordenades. Per aquest motiu s'ha decidit representar per a cada distància estudiada del blanc 1 (ja que és del que es disposa una major quantitat de mesures preses), l'error en cadascuna de les coordenades, independentment del punt que sigui (A, B, C, D, o E). A més, també es dibuixen línies de regressió lineal per tal de veure com és el comportament de les coordenades segons la distància i el mode de la càmera (*Figures 55-58*).

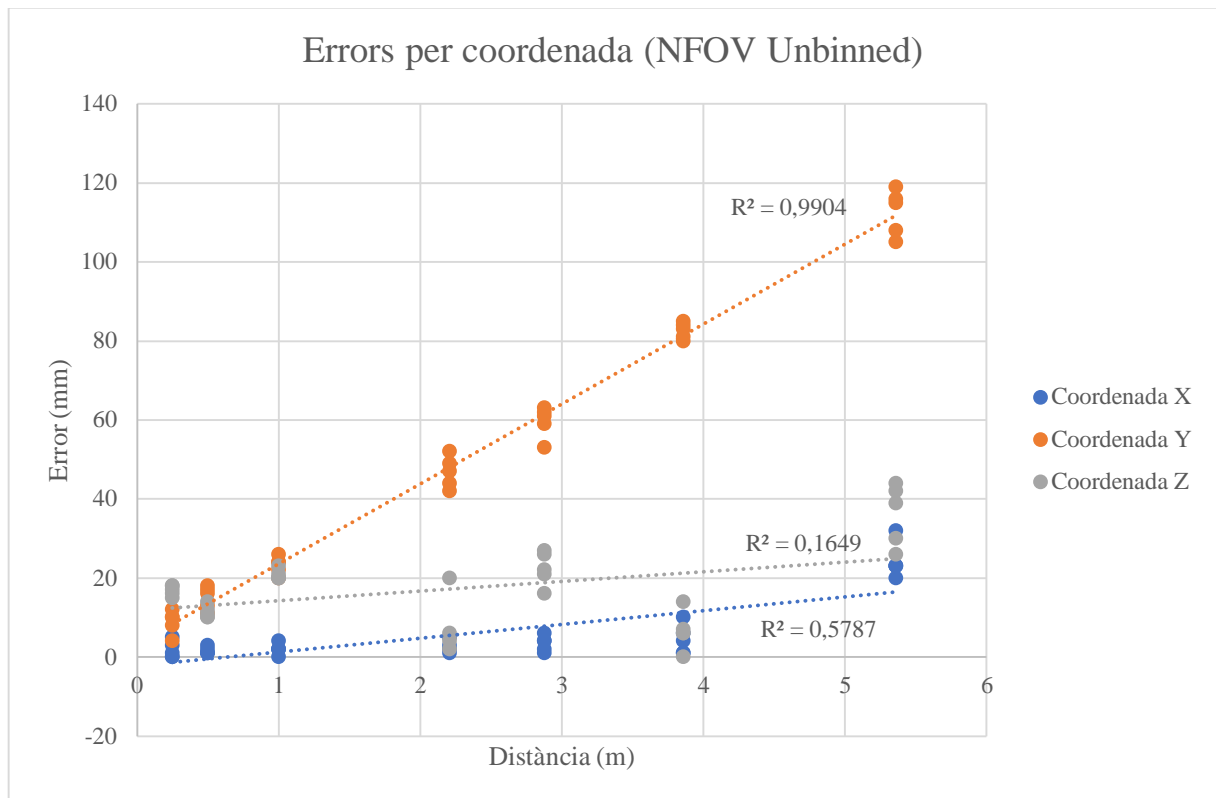


Figura 55 Representació dels errors de cada coordenada en funció de la distància (NFOV Unbinned).

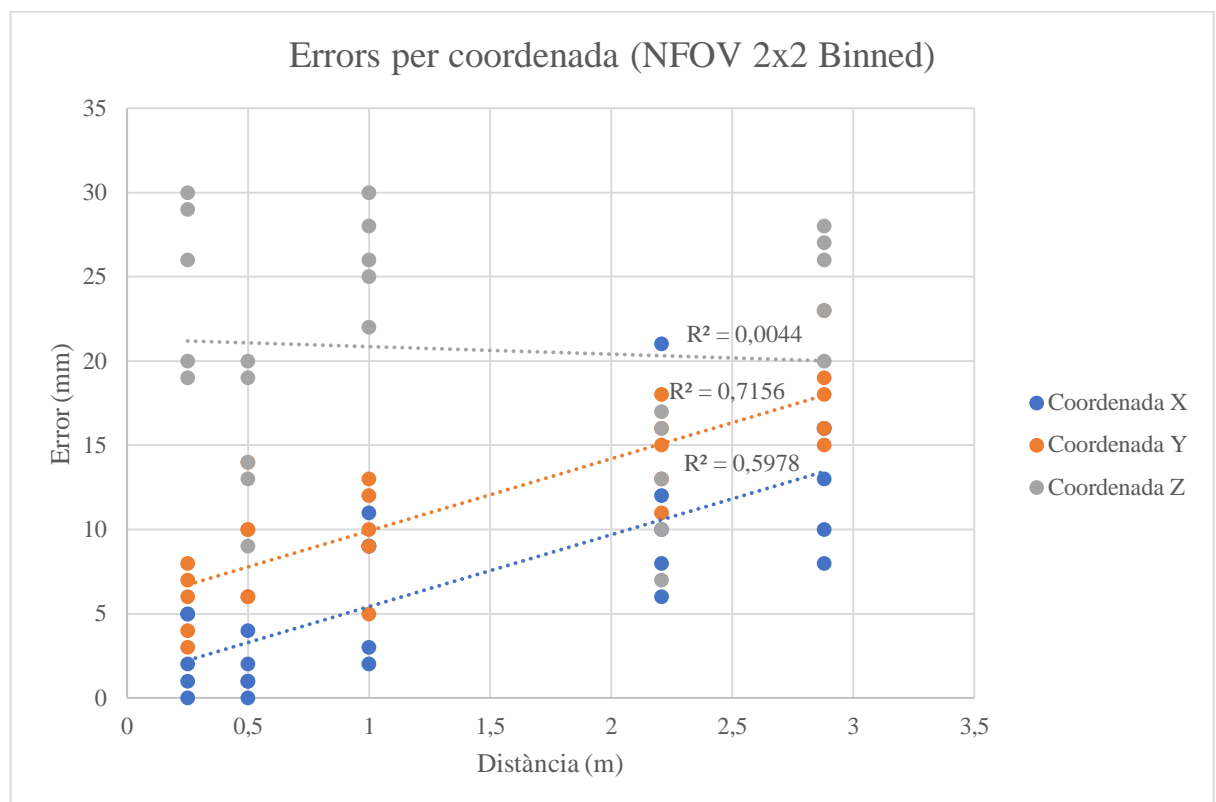


Figura 56 Representació dels errors de cada coordenada en funció de la distància (NFOV 2x2 Binned).

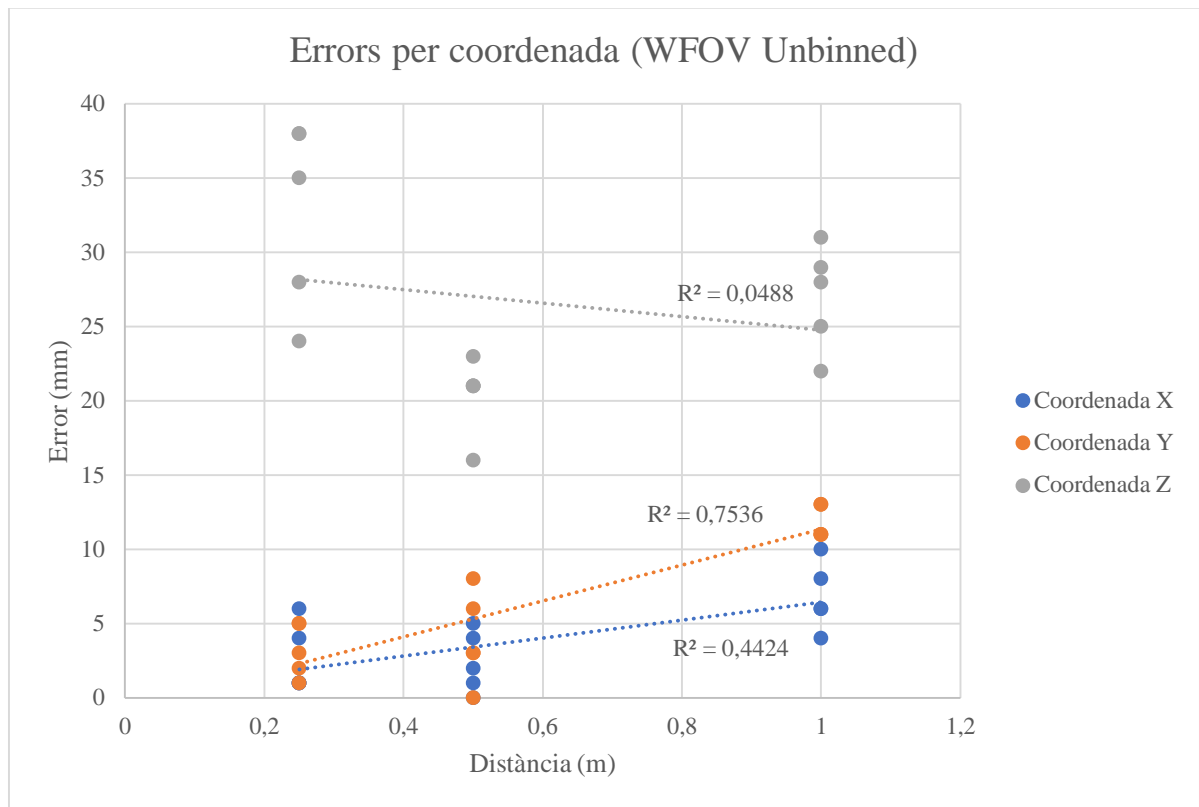


Figura 57 Representació dels errors de cada coordenada en funció de la distància (WFOV Unbinned).

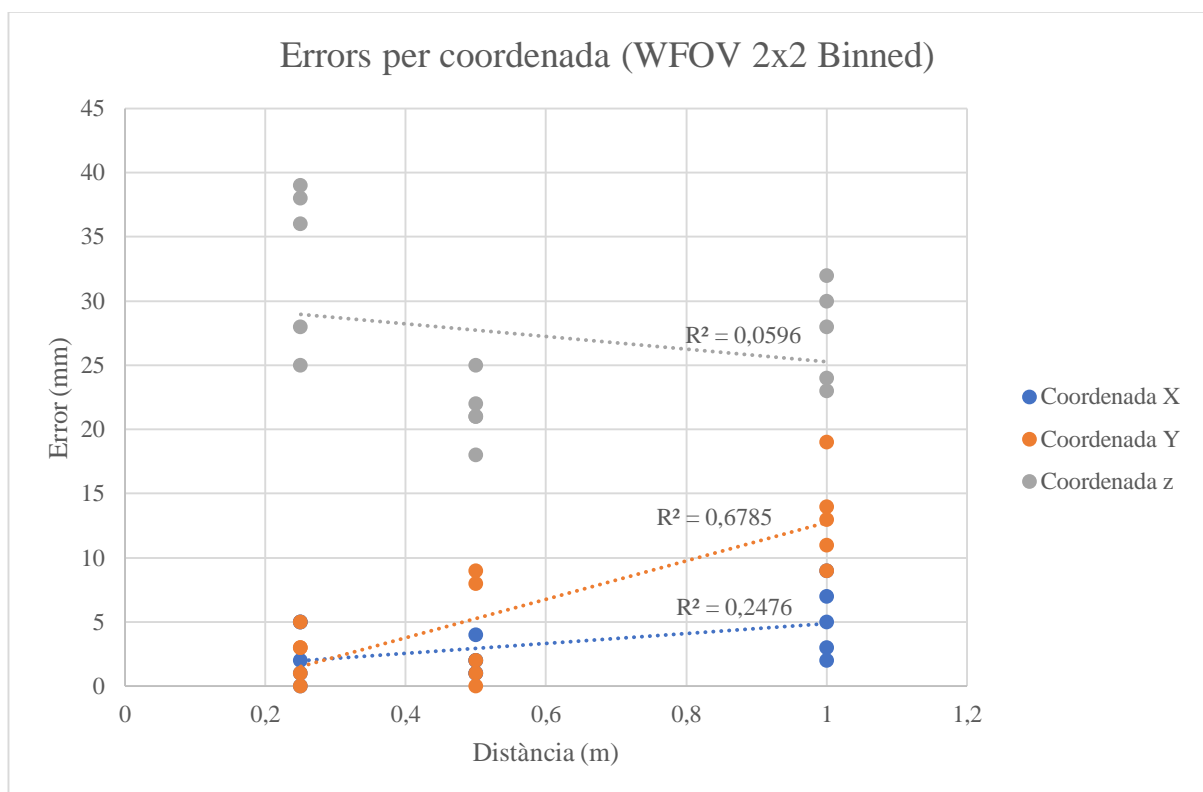


Figura 58 Representació dels errors de cada coordenada en funció de la distància (WFOV 2x2 Binned).

En tots els modes es veu un error en la coordenada y que creix de forma lineal. El mode on es veu més clarament això, és en el NFOV Unbinned (**Figura 55**) on el coeficient de determinació R^2 de l'ajust és de 0,990, és a dir els punts de la coordenada y ajusten de gran manera amb una recta. L'error en la coordenada x presenta una correlació lineal moderada/baixa amb la distància (R^2 entre 0.248 i 0.579). En el cas de les coordenada z no es veu dependència de l'error amb la distància en cap del modes, i pel que fa a l'ajust amb una tendència lineal és molt baix en tots el modes ($R^2 < 0.165$).

Si es tractés dels errors que es poden cometre al fer les mesures, el comportament més normal seria que l'error anés fluctuant aleatòriament i que hi haguessin canvis de signe. Però això no succeeix en la coordenada y . El que es té són valors similars en tots els punts i a més, van incrementant amb l'increment la distància (especialment en el mode NFOV Unbinned). En canvi en les coordenades de l'eix z no es veu aquest efecte, i en les de l'eix x no sembla haver tant impacte.

Per tot això es creu que aquest comportament pot ser degut al desfasament entre els sistemes de referència 2D (*RGB camera*) i 3D (*depth camera*). Ja que aquest desfasament es produeix amb un gir sobre l'eix x , explicaria que les coordenades de x no presentin tant error, i sí que es tingui aquest problema en les coordenades y i un lleuger efecte sobre les de z .

Tot i que en els resultats mostrats en les taules de l'apartat anterior, ja s'havia aplicat la correcció del desfasament que mostrava el fabricant (6 graus pel mode NFOV i 6+1,3 graus per al mode WFOV), es creu que són valors únicament orientatius i aproximats. Així doncs, s'ha buscat corregir aquest angle dels modes NFOV i WFOV, i ajustar-lo al màxim al de referència que és el de la càmera de color.

El procediment seguit per ajustar l'angle, s'ha basat en el procediment de comprovació de rangs de l'apartat anterior, on s'ha partit de 6 graus i 7,3 graus de referència per als modes NFOV i WFOV respectivament, s'ha fet un elevat número de proves fent petits canvis en aquests angles en el programa dissenyat, fins obtenir uns resultats en les coordenades y i z que s'ajustin més a la realitat i que ondulessin entre certs valors, tot deixant la linealitat que presentaven en l'apartat anterior.

Els angles que s'han acabat triant com a solució són 6,75 graus per al mode NFOV i 7 graus per al mode WFOV. Òbviament no són resultats definitius, s'han obtingut d'un procés de prova i error, i s'ha de ser conscient que poden haver angles que ajustin amb més precisió els resultats, però aquests que s'han trobat ja han sigut més que suficients per assolir la precisió que es vol en els assajos que es faran en aquest estudi.

6.3.6 Intensitat i intensitat corregida en distància

Dos paràmetres importants que s'han de considerar i que s'han inclòs en el programa dissenyat són la intensitat i la correcció en distància d'aquesta.

La intensitat fa referència a poder quantificar quina és la magnitud del senyal IR que retorna al sensor un cop ha sigut reflectit pel blanc objecte d'estudi. Gràcies a les llibreries de la càmera, s'ha pogut implementar que per cada punt generat del núvol també es guardi la intensitat. D'aquesta forma al fer servir el CloudCompare és possible obtenir el núvol de punts amb color, però també un núvol de punts d'intensitats, de forma que es pot veure a quins punts del blanc arriba major intensitat i trobar possibles errors de punts eliminats per saturació d'intensitat.

Un exemple es mostra en la **Figura 59**. Els colors més freds representen punts amb menor intensitat, mentre que els colors càlids són per punts amb major intensitat. La zona de concentració de major intensitat que es pot veure en la imatge, és provocada segurament perquè en el moment de fer la captura, l'emissor de rajos IR estava just davant d'aquesta zona, per tant és té una emissió amb major intensitat.

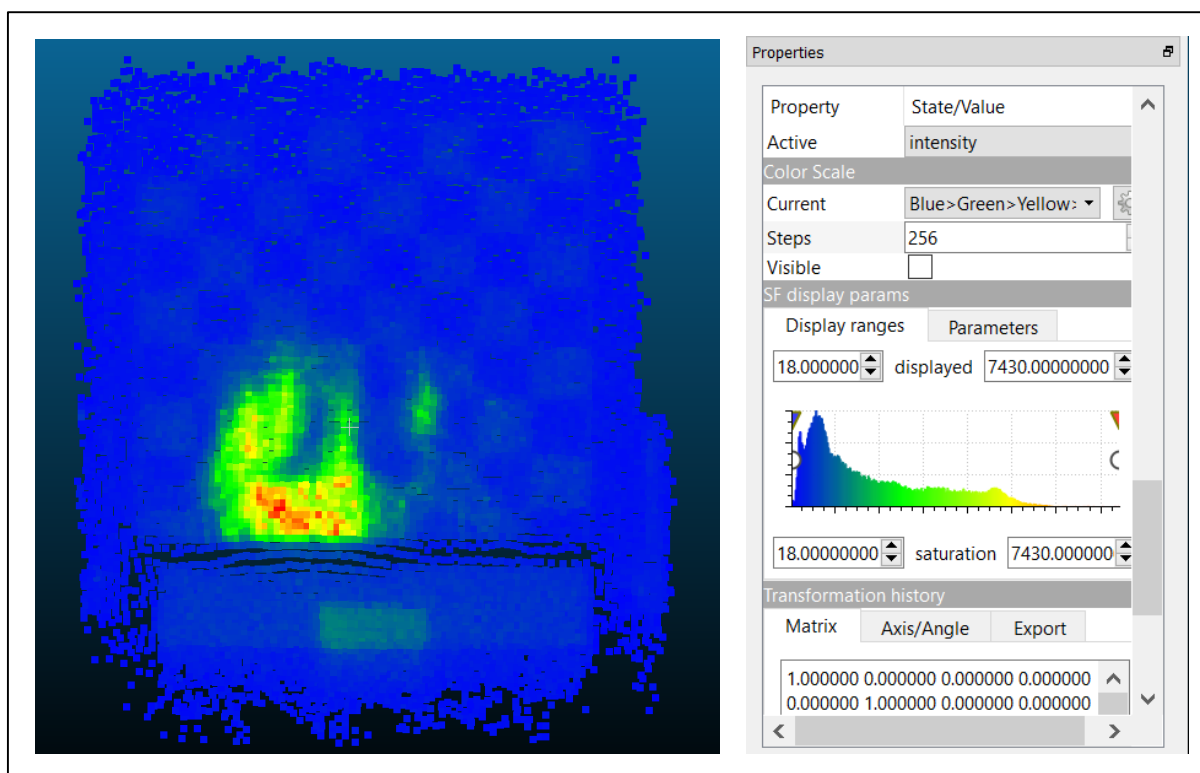


Figura 59 Esquerra: Exemple de un núvol de punts obert en el CloudCompare, però utilitzant la informació d'intensitat de cada punt. Dreta: Menú del CloudCompare per controlar l'escala en que es mostren les dades d'intensitat de la captura.

Un altre paràmetre important és la intensitat corregida en distància. Aquest paràmetre té origen en l'anomenada “*Inverse Square Law Formula*” la qual descriu la intensitat de la llum a diferents distàncies de la font de llum. Cada font de llum és diferent, però la intensitat canvia de la mateixa manera. Així doncs, la intensitat de la llum és inversament proporcional al quadrat de la distància a la font de llum. Lo qual vol dir que a mesura que la distància a la font de llum incrementa, la intensitat de la llum és igual a un valor anomenat rang de correcció de la intensitat multiplicat per la inversa de la distància al quadrat.

Per tant, de l'expressió de proporcionalitat (6):

$$I \propto \frac{1}{d^2} \quad (6)$$

on I és la intensitat en W/m^2 , \propto significa proporcionalitat i d és la distància a la font de llum; és possible deduir l'expressió del rang de correcció de la intensitat “ K ” (7):

$$I = K \cdot \frac{1}{d^2} \rightarrow K = I \cdot d^2 \quad (7)$$

La llum visible és part de l'espectre electromagnètic, i aquesta expressió trobada és vàlida per qualsevol altra llum en aquest espectre, per exemple la infraroja. Pel que fa a la distància al focus de llum, al tractar-se d'una posició tridimensional de cada punt, aquesta s'ha de calcular amb l'expressió (8) (veure **Figura 59** per entendre millor la nomenclatura utilitzada):

$$d = |\vec{d}| = \sqrt{x_A^2 + y_A^2 + z_A^2} \quad (8)$$

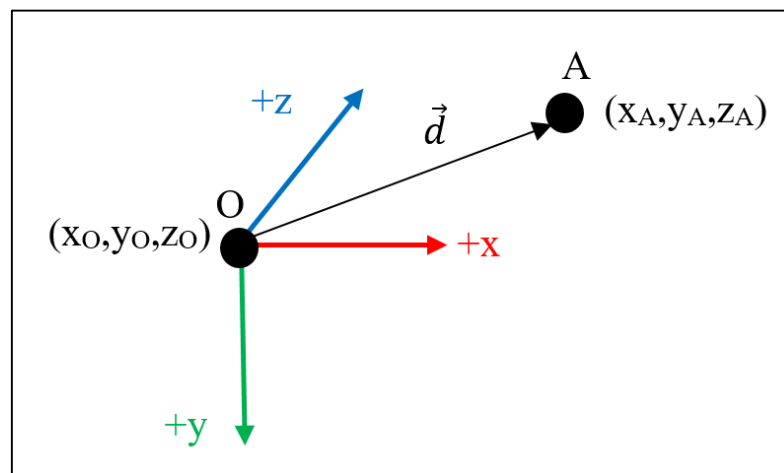


Figura 60 Esquematització del vector de distància de un punt A respecte l'origen del sistema de referència. El mòdul del vector de distància al punt A i la intensitat permeten calcular el rang de correcció de la intensitat d'aquest punt.

Per tant, en el programa dissenyat, també s'ha implementat aquesta expressió per tal de que cada punt també guardi el seu rang de correcció, a partir de la seva intensitat i el càlcul de la distància amb les coordenades de posició que defineixen el punt. D'aquesta manera, en el CloudCompare també es possible obtenir la visualització del núvol de punts amb la intensitat corregida en distància de cada punt.

Un exemple es mostra en la **Figura 61**, que és la mateixa captura que la de la **Figura 59**, per tant s'obté un mapa de color molt semblant ja que les intensitats són les mateixes, i únicament s'han multiplicat pel quadrat de les distàncies de cada punt.

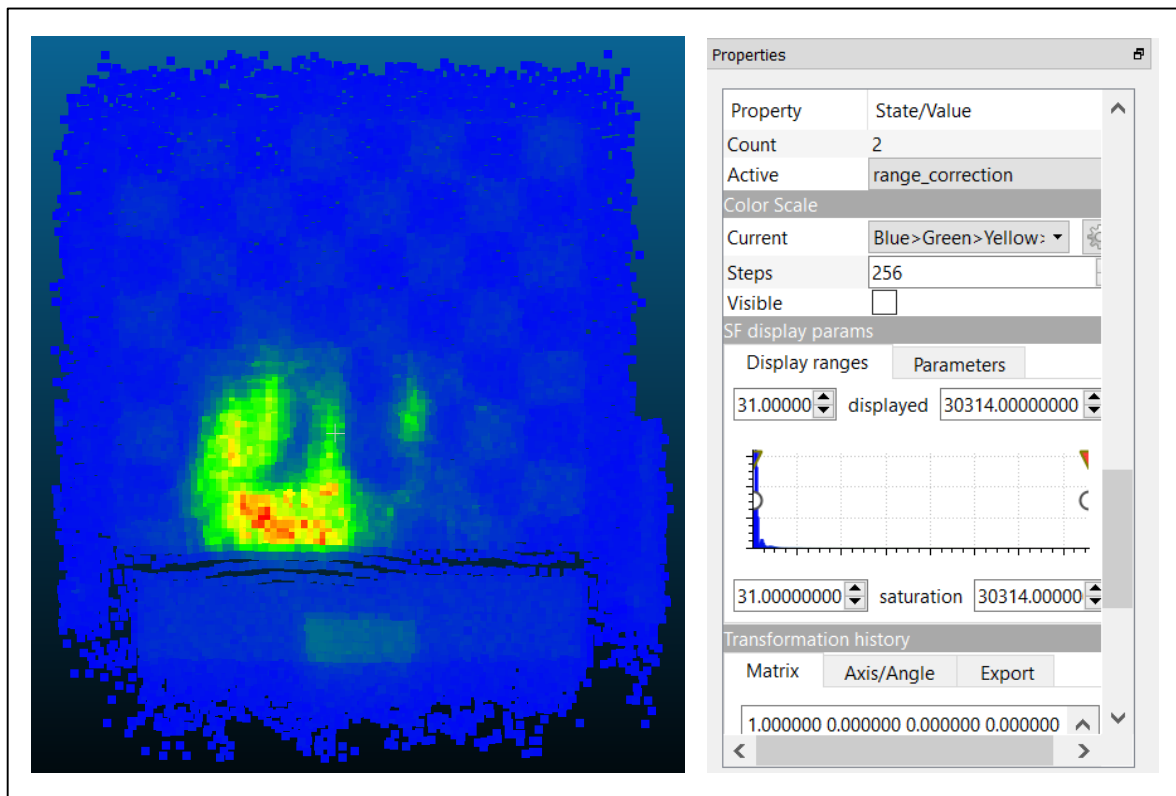


Figura 61 Esquerra: Exemple de un núvol de punts obert en el CloudCompare, però utilitzant la informació de correcció en distància de cada punt. Dreta: Menú del CloudCompare per controlar l'escala en que es mostren les dades de rang de correcció de la intensitat de la captura.

6.3.7 Funció de distribució de reflectància bidireccional

Fent els assajos d'interior, es va descobrir que es produïa un fenomen en les taules sobre les que es feia el assaig. Al veure el núvol de punts generat del blanc al que es dispara, es pot veure que les taules sobre les que es recolza el blanc, tenen trams en que la superfície de la taula desapareix (veure *Figura 62*).

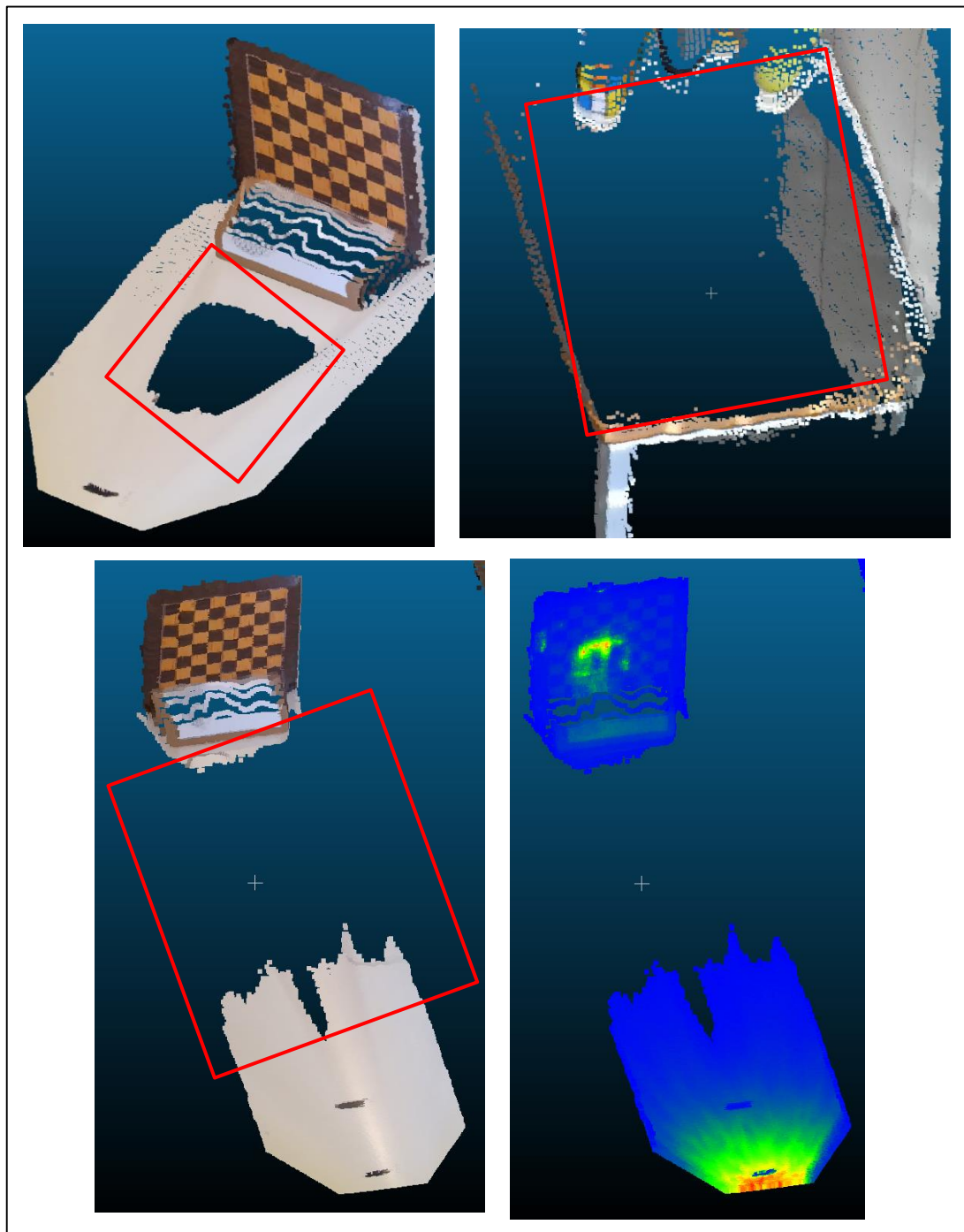


Figura 62 Captures de alguns núvols de punts oberts al CloudCompare, on s'indica amb un quadre vermell zones de la taula, sobre la que es recolza el blanc de l'assaig, en que els punts desapareixen.

A partir de la informació del fabricant, s'ha arribat a la conclusió de que aquest tipus de taules retornen poca intensitat IR. Això no significa que els taules reflecteixin poca energia, sinó que la reflecteixen per un rang concret d'angles sòlids. Sembla que les taules reflecteixen més en aquells angles propers a la normal de la superfície, i menys per a angles paral·lels.

Això es pot veure clarament en les imatges de la **Figura 62**, on superfície de taula propera al lloc on està la càmera sí que apareix en les imatges, ja que els angles de reflexió són molt propers a la normal de la superfície, en canvi a mesura que es té més distància, la taula comença a desaparèixer ja que els angles de reflexió són més oberts i propers al paral·lel de la superfície. Veient la imatge de intensitat, aquesta teoria es corrobora ja que els colors càlids de la taula, que impliquen major intensitat, es troben propers a la posició de la càmera, mentre que els colors freds apareixen a mesura que augmenta la distància amb la càmera. Com a detall, comentar que també es poden veure zones de superfície de la taula properes al blanc al que es dispara, i això es creu a que es degut a que el blanc limita la reflexió de la taula, i fa que alguns punts de la superfície, sí que retornin una senyal a la càmera.

Tot això ocorre degut a la funció de distribució de reflectància bidireccional (és una funció de quatre variables reals que defineix com la llum es reflecteix en una superfície opaca), que tot i que no s'entra en detall ja que no és l'objectiu de l'estudi, si que es creu necessari comentar-ho de cara a tenir en compte el tipus de superfícies dels blancs, materials dels blancs i muntatges de assajos que es puguin fer en estudis futurs.

7. AVALUACIÓ EXPERIMENTAL EN CONDICIONS D'INTERIOR

7.1 Descripció de l'assaig realitzat

L'assaig consisteix en comprovar l'error que es produeix, en condicions de llum controlada (interior) en les coordenades d'una sèrie punts seleccionats d'un taulell d'escacs, comparant el valor de cada coordenada que s'ha mesurat manualment, amb el valor que s'obté del núvol de punts, per a diferents distàncies. També s'han comparat els resultats obtinguts de la Azure Kinect, amb els resultats obtinguts en realitzar el mateix assaig amb la Kinect V2.

Els materials necessaris per l'assaig són: Azure Kinect, Kinect V2, taulell d'escacs, nivell de bombolla, mesurador de distàncies làser, metro i luxímetre.

El primer que s'ha fet és marcar els punts d'estudi sobre el taulell d'escacs. El dibuix i els colors del taulell d'escacs permeten identificar els punts més fàcilment, així doncs s'han marcat 5 punts identificats com A, B, C, D i E, tal i com es pot veure en la **Figura 63**.

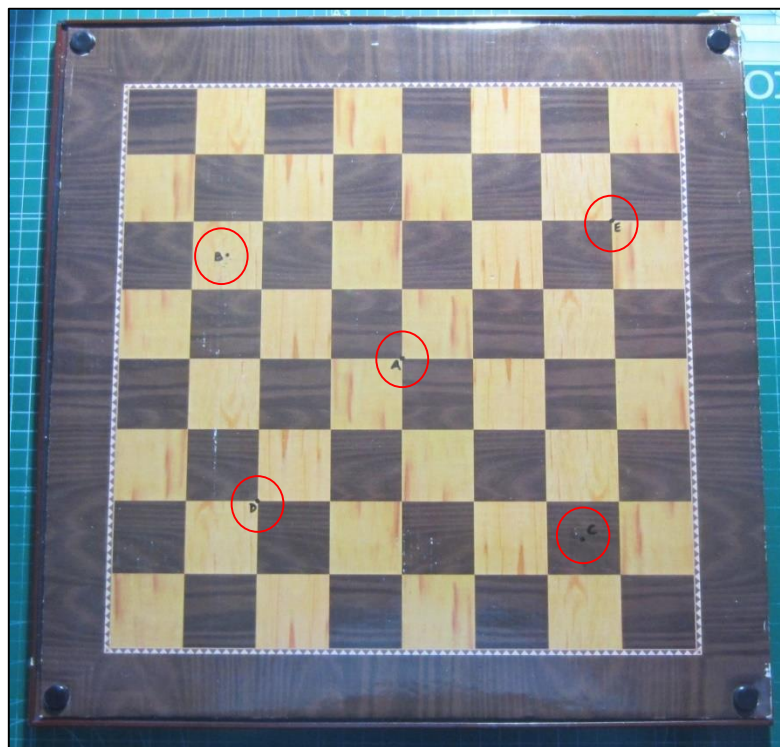


Figura 63 Taulell d'escacs amb la distribució de punts seleccionada per l'assaig.

A partir d'aquí s'ha fet un muntatge per poder captar aquests punts a diferents distàncies que es pot veure en la **Figura 64, 65 i 66**. S'han disposat una sèrie de taules en fila i s'ha marcat l'origen en un dels extrems on es col·locaran primerament la Azure Kinect i posteriorment la Kinect V2. A partir d'aquest origen, amb un metre s'han anat marcant diferents distàncies sobre la filera de taules, amb cinta adhesiva. En aquestes marques s'anirà col·locant el taulell d'escacs de forma perpendicular a la taula i es faran captures amb la càmera a cada distància, primer la Azure Kinect i després la Kinect V2.

Abans de fer les captures es necessita fer unes consideracions prèvies:

- Les distàncies marcades en les taules s'han fet tenint en compte els rangs dels modes de profunditat de la Azure Kinect, comprovats en el calibratge de la càmera, per tant s'ha decidit triar les següents distàncies: 0,5 m, 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m i 5,36 m (**Figura 64, esquerra**).
- La Azure Kinect pot treballar amb diferents modes de profunditat tal com s'ha vist en apartats anteriors, en canvi la Kinect V2 únicament treballa amb el seu mode de profunditat propi. Per tant, s'ha decidit a partir de realitzar el calibratge de la càmera, que únicament es realitzarà l'assaig de la Azure Kinect amb els modes NFOV Unbinned i WFOV Unbinned, i els resultats utilitzant aquests modes són els que es compararan amb els resultats de la Kinect V2.
- La Azure Kinect i la Kinect V2 tenen sistemes de referència diferents, per tant s'ha de ser conscient de quina coordenada s'està mesurant per a cada càmera (**Figura 64, dreta**).
- En la Azure Kinect el sistema de referència del modes de profunditat presenta una rotació de respecte el sistema de referència de la de color, però com s'ha vist en el calibratge de la càmera, ha estat possible aplicar una correcció d'aquest desfasament fent que únicament es tingui un sistema de referència, que segueix les direccions i sentits positius del sistema de referència de la càmera de color. El sistema de referència de la Kinect V2 tot i tenir diferències en el nom dels eixos respecte els de la Azure Kinect, les direccions són les mateixes i per tant, es poden comparar els resultats entre ells, tenint en compte quina coordenada s'ha de comparar de una càmera amb la de l'altra.
- Fet el muntatge, s'han de mesurar manualment les tres coordenades teòriques de cada punt, per cada càmera:

1. Per la Azure Kinect no suposa cap problema mesurar manualment la coordenada de l'eix z, ja que correspon a la distància a la que s'ha col·locat el taulell de la càmera. Però per la direcció y s'ha hagut de mesurar la coordenada com una diferència entre l'alçada a la que es troba el punt respecte la taula, i l'alçada a la que es troba l'origen de l'objectiu de la càmera respecte la taula.

Per a la coordenada x s'ha considerat que sempre es manté constant per a tots els punts, ja que durant tot l'assaig s'ha assegurat que l'eix vertical que divideix el taulell en dos meitats, sempre estigués alineat amb el origen de l'objectiu de la càmera (*Figura 68*).

2. S'ha fet exactament el mateix que el punt anterior per a la Kinect V2, però tenint en compte el nom dels eixos d'aquesta càmera.
- S'ha utilitzat un nivell de bombolla per evitar inclinacions de les càmeres, que poden afectar als valors de les coordenades dels punts de la captura (*Figura 67*).
 - S'ha fet servir un mesurador làser per comprovar la distància del taulell a la càmera. El làser també ajuda a mantenir alineat l'eix vertical central del taulell amb els objectiu de les càmeres per evitar desviacions en els valors de les coordenades (*Figura 68*).
 - S'ha fet servir un luxímetre per tenir una referència de la intensitat lluminosa que es tenia en l'habitació, a l'hora de fer l'assaig. S'ha anotat l'hora, el dia i tres mesures del luxímetre en tres zones diferents del muntatge, per realitzar una mitja de la intensitat lluminosa (*Figura 69*). Cal aclarir que els valors del luxímetre són purament orientatius i per tenir una referència de les condicions de l'assaig. Per futurs treballs es recomana utilitzar luxímetres més professionals dels que s'han utilitzat en aquest estudi.

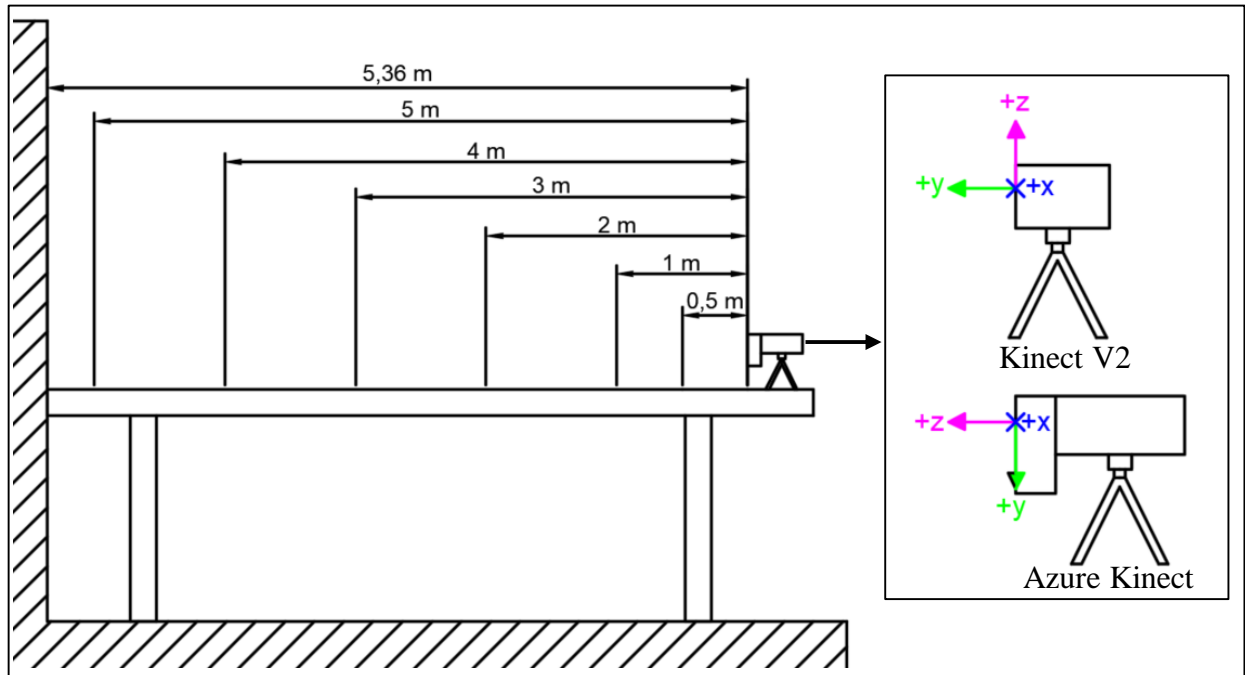


Figura 64 Esquematzació del muntatge realitzat per fer l'assaig. A l'esquerra es mostren les diferents distàncies a les que s'han mesurat les coordenades dels punts marcats al taulell d'escacs, respecte la càmera. A la dreta es té una vista en detall de la orientació dels eixos de la Kinect V2 i de la Azure Kinect a l'hora de fer l'assaig.



Figura 65 A l'esquerra es pot veure el muntatge realitzat on el taulell es troba a una certa distància de la càmera, sobre la filera de taules. A la dreta es pot veure en detall les diferents marques de distància sobre la taula, des del punt de vista de la càmera.



Figura 66 Imatges en detall de la disposició del taulell d'escacs enfront de les càmeres utilitzades en l'assaig.



Figura 67 Imatges de la utilització del nivell de bombolla per evitar una inclinació en qualsevol eix de les càmeres col·locades sobre un trípode. Les dos imatges de dalt corresponen a la Azure Kinect. La de a baix a la dreta correspon a la Kinect V2. La de baix a l'esquerra mostra la connexió de la Azure Kinect amb l'ordinador per corroborar a través del visualitzador i el nivell de bombolla que no hi ha inclinacions en els eixos de la càmera al disposar-la per fer l'assaig (el mateix s'ha fet amb la Kinect V2).

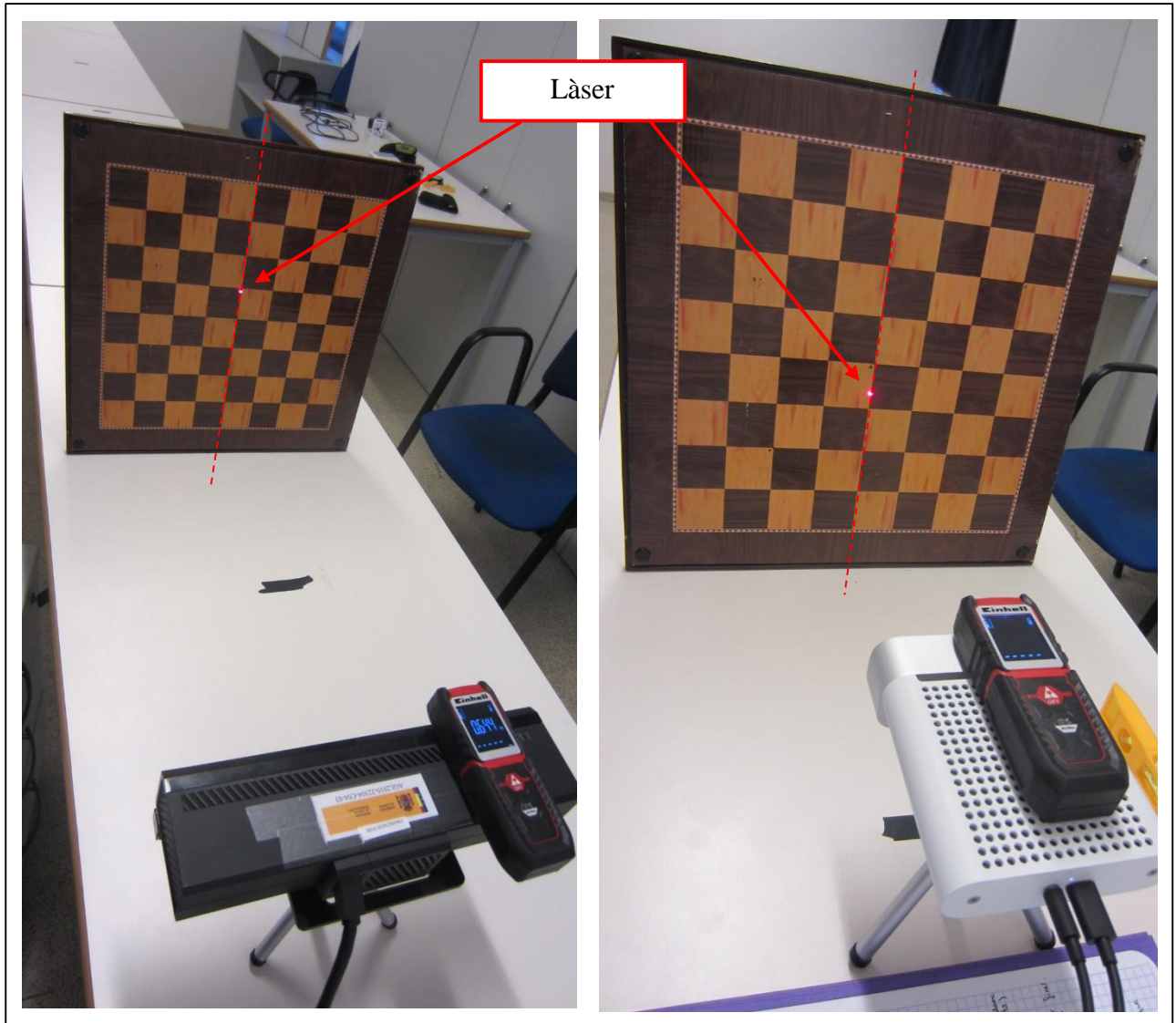


Figura 68 Imatges en detall de la utilització del mesurador làser per mantenir l'eix central del taulell, alineat amb l'objectiu de cada càmera. A l'esquerra es té la posició del mesurador làser per a la Kinect V2. A la dreta es té la posició del mesurador làser per a la Azure Kinect. El mesurador làser també permet corroborar que el taulell està ben col·locat en la seva marca de distància respecte cada càmera, ja que a través de la seva pantalla també es pot veure la distància a la que impacte el làser que emet.



Figura 69 Imatges de la utilització del luxímetre en diferents zones del muntatge, per obtenir les lectures de la intensitat lluminosa en el moment de fer l'assaig.

Donat que les càmeres van connectades a l'ordinador, és possible executar el programa de cadascuna d'elles per a que realitzin una captura i generin el núvol de punts pertinent. Aquest núvol queda guardat en un directori per analitzar-lo en el CloudCompare (apart també es guarden imatges a color, de profunditat i IR per poder contrastar el resultat obtingut del núvol de punts).

Un cop es té l'arxiu obert en CloudCompare, és possible seleccionar cadascun dels punts marcats sobre el taulell d'escacs, per obtenir les seves coordenades i així comparar-les amb les mesures reals realitzades, i veure quin és l'error que es comet (*Figura 70*).

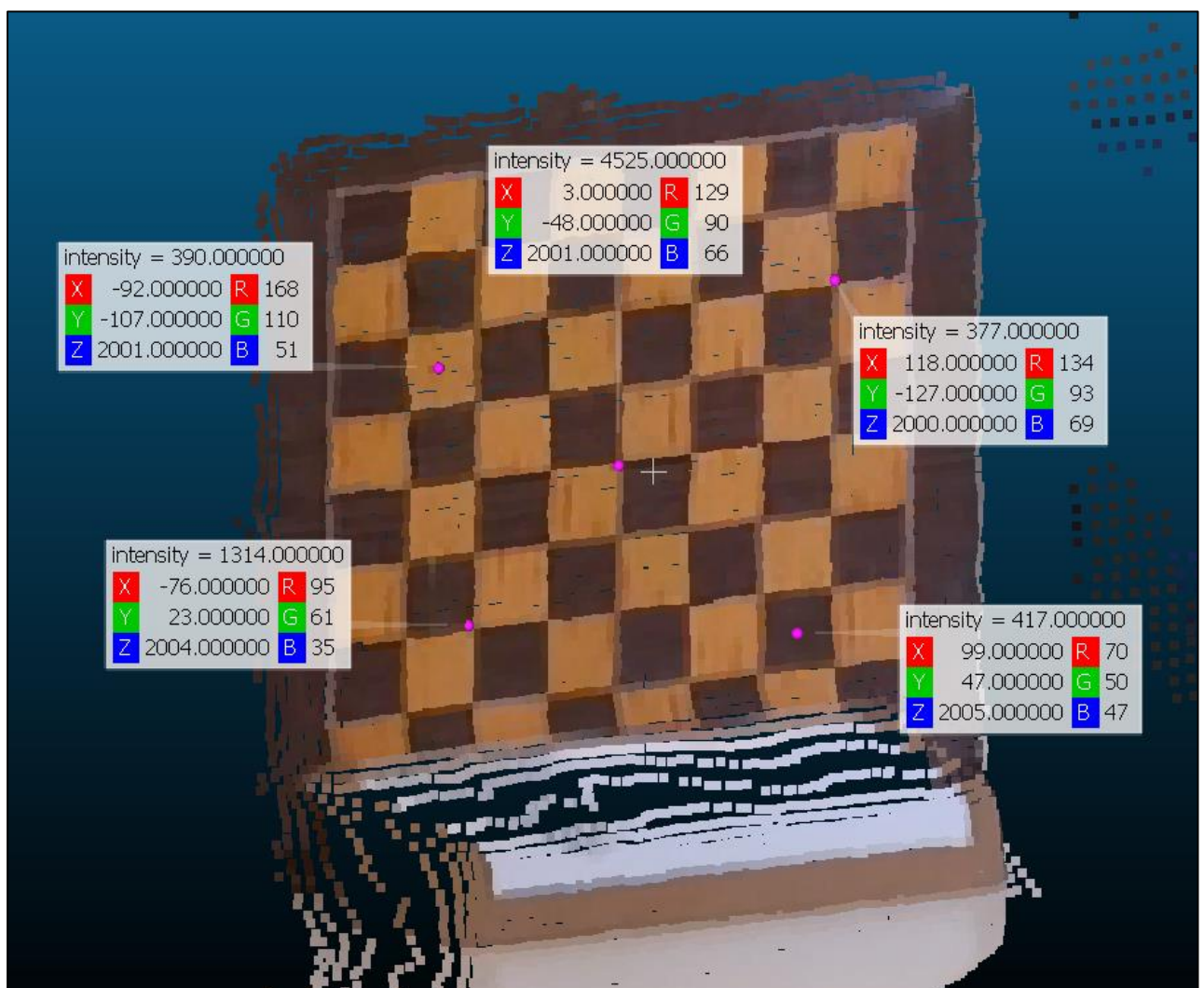


Figura 70 Exemple del tractament del núvol de punts que s'ha fet amb el CloudCompare per a una captura a una certa distància. El programa crea un quadre informatiu amb les coordenades de cada punt seleccionat del taulell d'escacs.

7.2 Resultats i discussió

7.2.1 Taules resum de les captures

En aquest apartat es recullen els resultats obtinguts amb la Azure Kinect i la Kinect V2 per l'assaig en condicions controlades (interior). Primerament es mostraran unes taules resum (**Taules 14-16**) de les captures obtingudes amb cada càmera per cada distància, i posteriorment una taula de cada càmera amb els errors en cada coordenada (**Taules 20-22**). A partir d'aquí es compararan les dues càmeres.

També es compararan els resultats obtinguts amb els dos modes de profunditat assajats de la Azure Kinect. Cal tenir en compte que en el muntatge s'han marcat diferents distàncies a les que el mode NFOV pot arribar (ja que és el mode amb major rang), però per al mode WFOV algunes distàncies queden fora del seu rang i no s'obté una imatge clara del núvol de punts. És important comparar aquests dos modes per veure quin dels dos funciona millor per a futures aplicacions. El mode que obtingui millors resultats és el que s'utilitzarà per al assaig en exterior, ja que no es disposa de temps ni de infraestructura per poder fer molts assajos, es prefereix prioritzar el que té millors resultats en interior, que generalment, és el que tindrà millors resultats en exterior.

Igual que amb el mode WFOV, la Kinect V2 no arriba a totes les distàncies a les que si arriba el NFOV, per tant alguna de les distàncies no donava un núvol de punts clar sobre el que mesurar les coordenades dels punts, i s'ha tingut que descartar.

S'ha de dir que aquests assajos es van realitzar sense tenir en compte el problema dels *mixed pixels*^[7]. Per tant, es pot veure en les captures del núvol de punts (fetes al CloudCompare) que s'inclouen en les taules resum (**Taules 14-16**), que es presenta una certa distorsió en els cantells del taulell, que va incrementant a mesura que augmenta la distància. Tot i això, no ha afectat en els resultats d'aquest assaig, ja que tots els punts mesurats es troben relativament lluny dels cantells del taulell d'escacs, i s'han pogut mesurar les seves coordenades.

També cal aclarir que les captures amb la Azure Kinect permeten extreure imatge de color, de profunditat (escala de grisos i escala de colors) imatge IR i núvol de punts, mentre que la Kinect V2 només permet extreure imatge de color, imatge IR i núvol de punts, per aquest motiu les taules resum (**Taules 14-16**) que es mostren a continuació tenen més informació per la Azure Kinect que no pas per la Kinect V2.


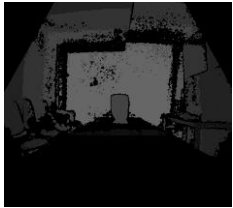
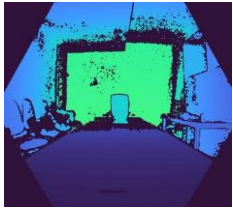
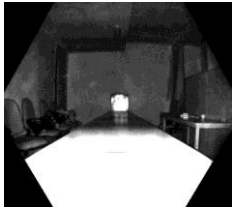

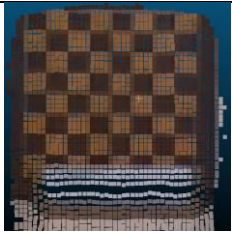


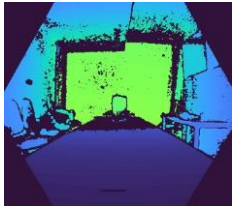
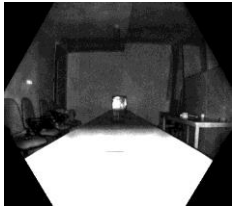




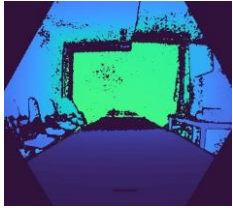



[7] Veure problema dels “mixed pixels” en l'apartat “6.3 Calibratge de la càmera”.





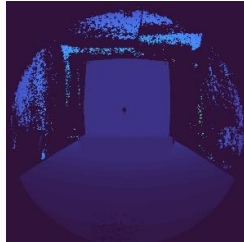
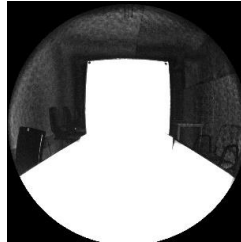


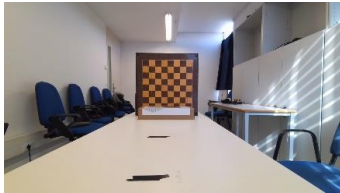

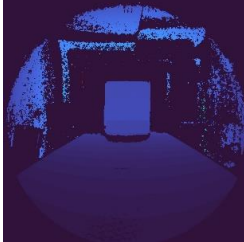






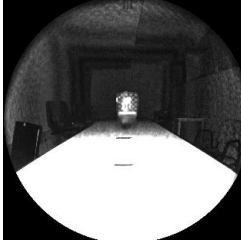
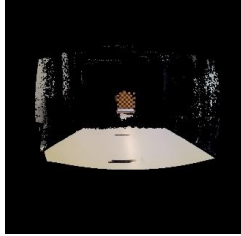

Taula 14 (Part I) Captures de la Azure Kinect a distàncies de 0,5 m, 1,0 m, 2,0 m, 3,0 m, 4,0 m, 5,0 m i 5,36 m utilitzant el mode NFOV Unbinned.

Distància	Imatge de color	Imatge de profunditat (escala grisos)	Imatge de profunditat (escala colors)	Imatge IR	Imatge transformada (color + profunditat)	Núvol de punts
0,5 m						
1,0 m						
2,0 m						
3,0 m						

Taula 14 (Part II) Captures de la Azure Kinect a distàncies de 0,5 m, 1,0 m, 2,0 m, 3,0 m, 4,0 m, 5,0 m i 5,36 m utilitzant el mode NFOV Unbinned.


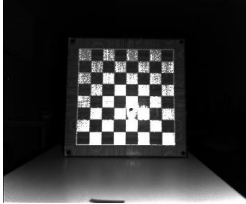

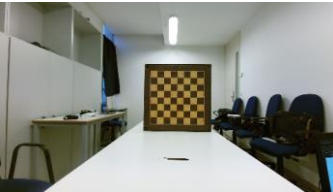
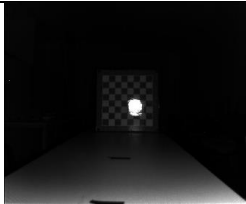

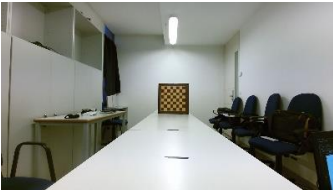
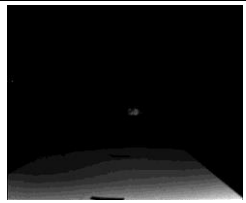

Distància	Imatge de color	Imatge de profunditat (escala grisos)	Imatge de profunditat (escala colors)	Imatge IR	Imatge transformada (color + profunditat)	Núvol de punts
4,0 m						
5,0 m						
5,36 m						

Taula 15 Captures de la Azure Kinect a distàncies de 0,5 m, 1,0 m i 2,0 m utilitzant el mode WFOV Unbinned.

Distància	Imatge de color	Imatge de profunditat (escala grisos)	Imatge de profunditat (escala colors)	Imatge IR	Imatge transformada (color + profunditat)	Núvol de punts
0,5 m						
1,0 m						
2,0 m						



Taula 16 Captures de Kinect V2 a distàncies de 0,5 m, 1,0 m i 2,0 m.

Distància	Imatge de color	Imatge IR	Núvol de punts
0,5 m			
1,0 m			
2,0 m			

7.2.2 Resultats de cada càmera

Abans d'entrar en els resultats numèrics obtinguts, es interessant fer un anàlisi qualitatiu de les captures que s'han realitzar per cada càmera i distància, per tal de tenir una referència del que es pot trobar al fer un estudi més analític dels resultats:

- Amb la Azure Kinect i el mode NFOV Unbinned (**Taula 14**) es mostra clarament en les captures de núvol de punts el efecte dels *mixed pixels*. La part superior del taulell del taulell va desapareixent a mesura que s'augmenta la distància. En canvi, quan s'arriba als 5,36 m, com el taulell es troba recolzat sobre una paret, l'efecte dels *mixed pixels* desapareix i es possible veure el taulell complet. A la distància de 0,5 m es possible observar una zona concreta del taulell que desapareix, degut a la saturació de intensitat dels rajos IR emesos, possiblement degut a que aquesta zona està justament davant del emissor IR de la càmera i els rajos arriben amb major intensitat i es concentren en aquesta zona. Comparat amb els núvols de punts que s'obtenen el mode WFOV Unbinned i amb la Kinect V2, el mode NFOV Unbinned és, sens dubte, el que permet veure gran part del taulell per a totes les distàncies estudiades.
- Pel que fa a la Azure Kinect amb el mode WFOV Unbinned (**Taula 15**), presenta un núvol de punts molt ben definit, amb poc efecte de *mixed pixels*, a 0,5 m i 1 m, el problema es que en quan arriba a la frontera dels 2 m ja es perd gran part del taulell i fa impossible obtenir resultats a majors distàncies. Igual que amb el mode NFOV Unbinned, als 0,5 m, es mostra una petita zona dintre del taulell on es perden alguns píxels, degut a la saturació de la llum IR.
- La Kinect V2 presenta unes captures (**Taula 16**), que a nivell qualitatiu són millors que el mode WFOV Unbinned, però lleugerament inferiors als de la NFOV Unbinned de la Azure Kinect. La forma del taulell es manté en totes les captures (sembla que el efecte dels *mixed pixels* no es tan pronunciat amb aquesta càmera), però per altra banda la pèrdua de píxels per saturació de la llum IR sí que es superior que amb la Azure Kienct, tal com es pot veure en la captura de núvol de punts a 0,5 m i 1 m. A més, així com la Azure Kinect va perdent resolució fins arribar a una distància en la que es deixa de veure el taulell, la Kinect V2 sembla no perdre tanta resolució ja que el taulell és visible i es pot distingir la quadricula, fins que arriba a una barrera de distància on el taulell desapareixer completament i no es possible prendre mesures a distàncies superiors (sobre els 4 m). Tot i això, únicament s'han pres mesures fins 2 m, en aquest assaig amb la Kinect V2, per poder-lo comparar amb el mode WFOV Unbinned de la Azure Kinect.

Fet aquest anàlisi, ara ja es té una referència per entendre i tractar els resultats numèrics obtinguts.

A continuació es mostren les taules (**Taules 20-22**) que recullen els resultats numèrics obtinguts per cada càmera i mode de profunditat en aquest assaig. Només es presenten els errors per tal de simplificar les taules, es possible veure les taules complertes en els Annexes d'aquest estudi.

Per cada distància es té:

- Mostra: Valor de la coordenada indicada d'un cert punt, mesurada en el CloudCompare, és a dir, sobre el núvol de punts generat per aquella distància.
- Real: Valor de la coordenada indicada, d'un cert punt, mesurada manualment sobre el blanc físic.
- Error: Diferència entre el valor de la mostra i el valor real, per tal de conèixer quina és la desviació de la posició dels punts generats, respecte els reals.

Per cada punt estudiat del taulell d'escacs, es tenen les seves tres coordenades que defineixen la seva posició, i també es pot extreure el mòdul tant el real com el de les mostres. Donat que el nom dels eixos de les dos càmeres és diferent, s'han agafat com a referència els eixos de la Azure Kinect i s'ha referit a aquests els de la Kinect V2, per tal que sigui més fàcil fer comparacions entre les càmeres.

Abans però, es presenten les **Taules 17-19** que recullen l'hora, la data i les lectures del luxímetre per cada assaig:

Taula 17 Informació de l'assaig realitzat per la Azure Kinect per al mode NFOV Unbinned.

Azure Kinect (NFOV Unbinned)				
Hora	Data	nº repetició	LUX	Mitja
17:55	24/02/2020	1	497	568,33
		2	677	
		3	531	

Taula 18 Informació de l'assaig realitzat per la Azure Kinect per al mode WFOV Unbinned.

Azure Kinect (WFOV Unbinned)				
Hora	Data	nº repetició	LUX	Mitja
15:29	26/02/2020	1	521	522,00
		2	629	
		3	416	

Taula 19 Informació de l'assaig realitzat per Kinect V2.

Kinect V2				
Hora	Data	nº repetició	LUX	Mitja
18:12	25/02/2020	1	597	561,67
		2	608	
		3	480	



Taula 20 Resultats de l'assaig per a la Azure Kinect amb el mode de profunditat NFOV Unbinned.

Distància		Azure Kinect (NFOV Unbinned)																			
		A				B				C				D				E			
		X	Y	Z	Mòdul	X	Y	Z	Mòdul	X	Y	Z	Mòdul	X	Y	Z	Mòdul	X	Y	Z	Mòdul
0,5 m	Error (mm)	1	-3	6	6	2	-3	5	5	3	0	7	7	0	-1	7	7	4	-4	5	7
1,0 m	Error (mm)	2	-1	13	13	2	-3	14	14	3	0	10	10	-2	-1	11	11	4	-3	14	15
2,0 m	Error (mm)	3	2	1	1	3	0	1	1	4	4	5	5	-1	0	4	4	5	-2	0	0
3,0 m	Error (mm)	5	-4	6	6	5	-6	12	12	5	-2	4	4	3	0	8	8	5	-6	7	7
4,0 m	Error (mm)	7	-6	4	4	7	-4	10	10	7	-4	4	4	2	-8	6	6	5	-11	7	7
5,0 m	Error (mm)	-2	-10	2	2	5	-3	-4	-4	2	-5	3	3	4	-5	0	0	4	-5	0	0
5,36 m (paret)	Error (mm)	-2	-4	-13	-13	9	-10	-14	-14	-1	-2	-9	-9	-1	8	-9	-9	2	-3	-10	-10

Taula 21 Resultats de l'assaig per a la Azure Kinect amb el mode de profunditat WFOV Unbinned (N/A correspon a coordenades que no estan disponibles ja que aquesta càmera amb aquest mode no permet veure aquests punts indicats, en el núvol de punts generat).

Distància		Azure Kinect (WFOV Unbinned)																			
		A				B				C				D				E			
		X	Y	Z	Mòdul	X	Y	Z	Mòdul	X	Y	Z	Mòdul	X	Y	Z	Mòdul	X	Y	Z	Mòdul
0,5 m	Error (mm)	0	-1	13	13	-2	-2	12	12	1	1	6	6	-2	1	6	6	4	-2	15	16
1,0 m	Error (mm)	2	3	8	8	3	1	8	8	2	5	3	3	-1	3	5	5	3	2	9	9
2,0 m	Error (mm)	3	12	-5	-5	N/A	N/A	N/A	N/A	3	12	-16	-16	-1	13	-1	-1	N/A	N/A	N/A	N/A

Taula 22 Resultats de l'assaig per a la Kinect V2 (les coordenades entre parèntesis són les originals de aquesta càmera que s'han referit als de la Azure Kinect).

Distància		Kinect V2																			
		A				B				C				D				E			
		X(+X)	Y(-Z)	Z(+Y)	Mòdul	X(+X)	Y(-Z)	Z(+Y)	Mòdul	X(+X)	Y(-Z)	Z(+Y)	Mòdul	X(+X)	Y(-Z)	Z(+Y)	Mòdul	X(+X)	Y(-Z)	Z(+Y)	Mòdul
0,5 m	Error (mm)	4	15	32	32	6	17	37	33	5	15	23	25	4	18	26	27	4	18	33	30
1,0 m	Error (mm)	0	29	25	25	3	32	28	26	1	31	24	26	1	30	20	22	0	29	32	30
2,0 m	Error (mm)	12	64	51	51	5	66	53	52	9	64	42	45	12	66	39	42	13	65	61	58

A partir d'aquestes taules de resultats (**Taules 20-22**) s'han elaborat unes gràfiques per tal de que sigui més clarificador el comportament de les càmeres i poder-les estudiar per separat i entre elles.

Per això s'han estudiat els errors obtinguts i s'han agrupat de la següent manera:

- Error per distància: Es tracta d'una mitja de l'error de cadascuna de les coordenades de cada punt, a una distància determinada. Permet veure per a cada distància, quin és el error mig que es comet en x, y i z, independentment de la posició dels punts. Aquest error s'obté de l'expressió (9).

$$error_{distància(x,y,z)} = \frac{\sum |error_{(x,y,z)}|}{n^{\circ} punts estudiats} \quad (9)$$

- Error per punt: Es tracta d'una mitja d'una coordenada d'un punt determinat, per a totes les distàncies estudiades. Permet veure per a cada coordenada de cada punt, quin és l'error en el total de distàncies estudiades, que comet cada càmera. Aquest error es calcula mitjançant l'expressió (10).

$$error_{punt(x,y,z)} = \frac{\sum |error_{(Px,Py,Pz)}|}{n^{\circ} distàncies estudiades} \quad (10) \quad \text{on } P \text{ pot ser } A, B, C, D \text{ o } E$$

A partir d'aquestes expressions s'han pogut realitzar la **Taula 23** i la **Taula 24**, i fer les representacions gràfiques corresponents (**Figures 71-74**).

Cal aclarir, que el mode WFOV Unbinned només es tenen mesures fins als 2,0 m de distància, per tant l'error per punt, només es calcularà per a 0,5 m, 1,0 m i 2,0 m que són les distàncies comuns a les que poden arribar tots els sensors, de manera que és possible comparar-los entre ells (**Taula 24** i **Figura 74**).



Taula 23 Error per distància, obtingut per a cada càmera i mode, a cada distància de les coordenades x, y i z (en mil·límetres).

Càmera	Azure Kinect (NFOV Unbinned)			Azure Kinect (WFOV Unbinned)			Kinect V2		
Distància (m)	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0,5	2,00	2,20	6,00	1,80	1,40	10,40	4,60	16,60	30,20
1,0	2,60	1,60	12,40	2,20	2,80	6,60	1,00	30,20	25,80
2,0	3,20	1,60	2,20	2,33	12,33	7,33	10,20	65,00	49,20
3,0	4,60	3,60	7,40	-	-	-	-	-	-
4,0	5,60	6,60	6,20	-	-	-	-	-	-
5,0	3,40	5,60	1,80	-	-	-	-	-	-
5,36	3,00	5,40	11,00	-	-	-	-	-	-



Taula 24 Error per punt, obtingut per a cada càmera i mode, a cada coordenada dels punts estudiats (en mil·límetres).

Càmera	Ax	Ay	Az	Bx	By	Bz	Cx	Cy	Cz	Dx	Dy	Dz	Ex	Ey	Ez
Azure Kinect (NFOV Unbinned)	2,00	2,00	6,67	2,33	2,00	6,67	3,33	1,33	7,33	1,00	0,67	7,33	4,33	3,00	6,33
Azure Kinect (WFOV Unbinned)	1,67	5,33	8,67	2,50	1,50	10,00	2,00	6,00	8,33	1,33	5,67	4,00	3,50	2,00	12,00
Kinect V2	5,33	36,00	36,00	4,67	38,33	39,33	5,00	36,67	29,67	5,67	38,00	28,33	5,67	37,33	42,00

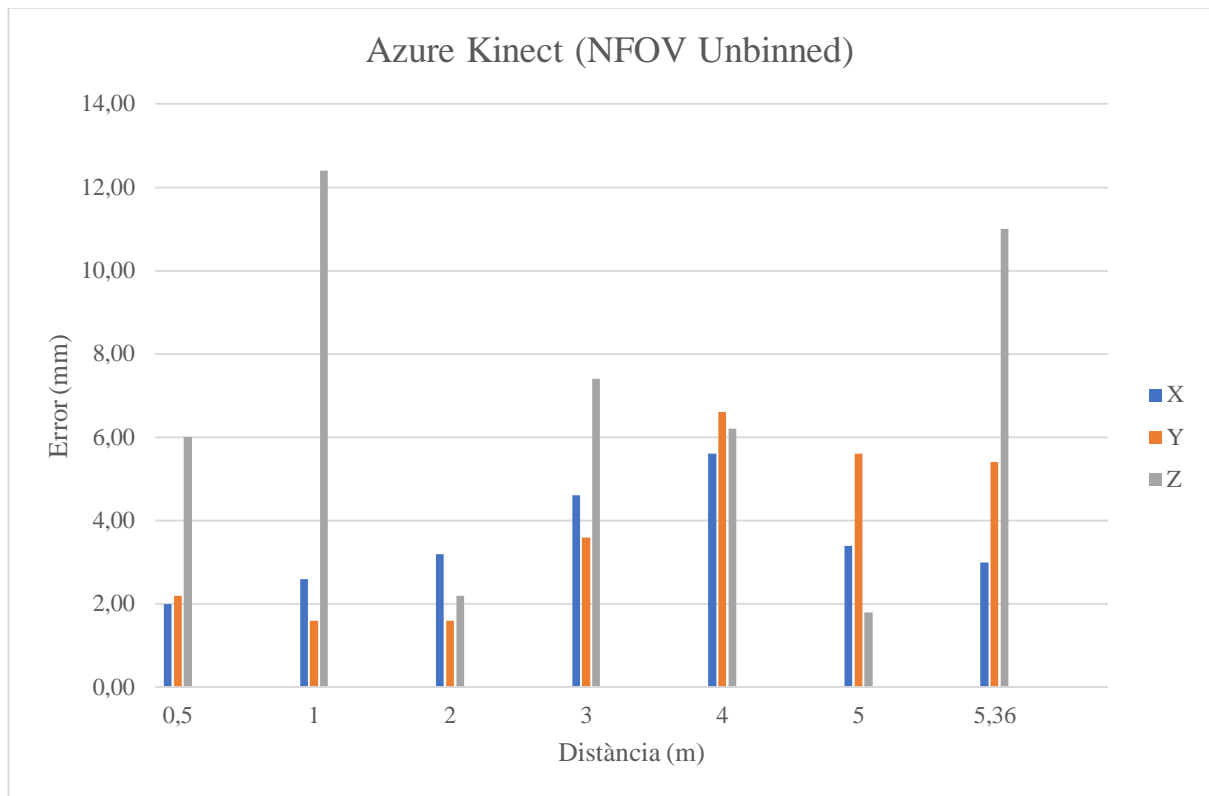


Figura 71 Comparativa de l'error per distància, en les coordenades x, y i z de la Azure Kinect amb el mode NFOV Unbinned.

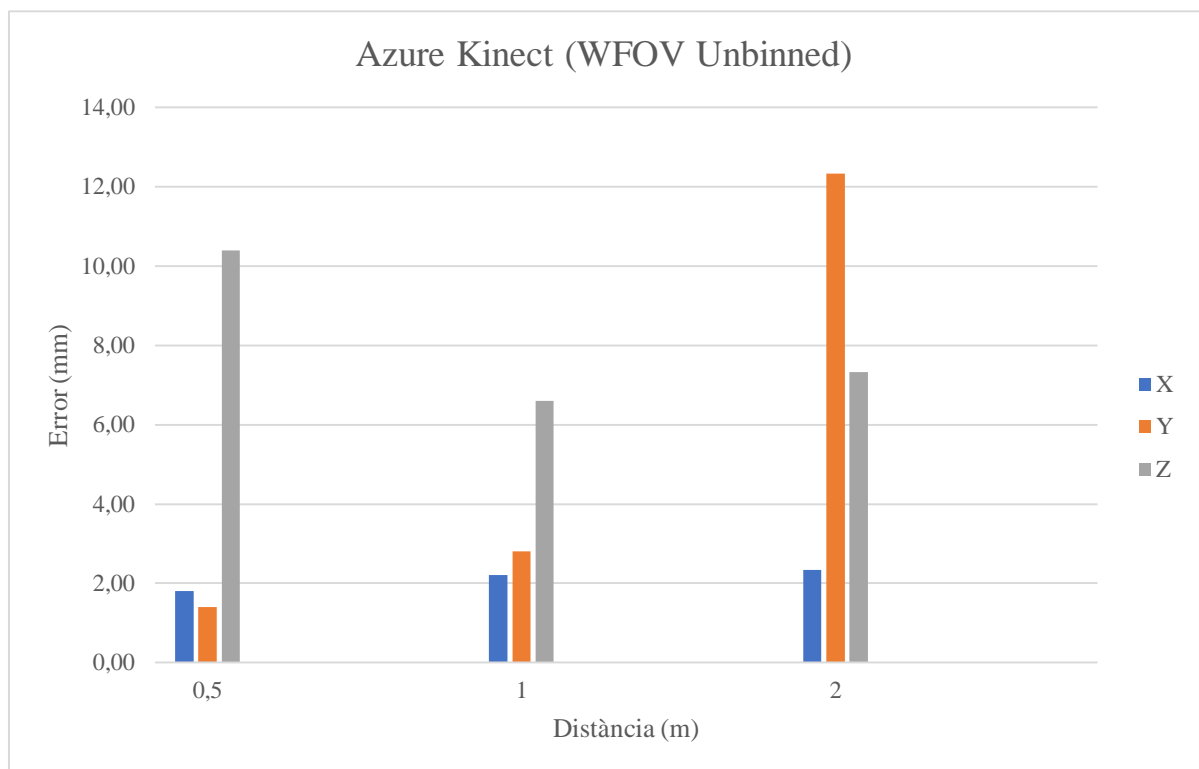


Figura 72 Comparativa de l'error per distància, en les coordenades x, y i z de la Azure Kinect amb el mode WFOV Unbinned.

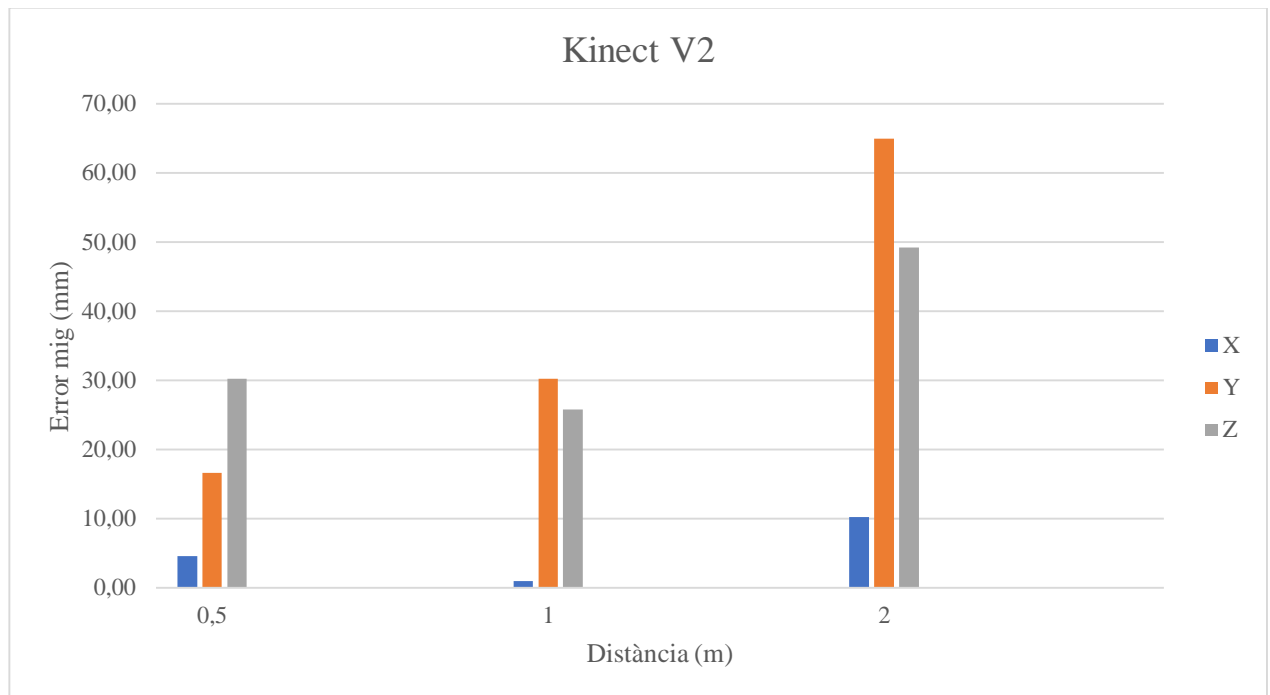


Figura 73 Comparativa de l'error per distància, en les coordenades x, y i z de la Kinect V2.

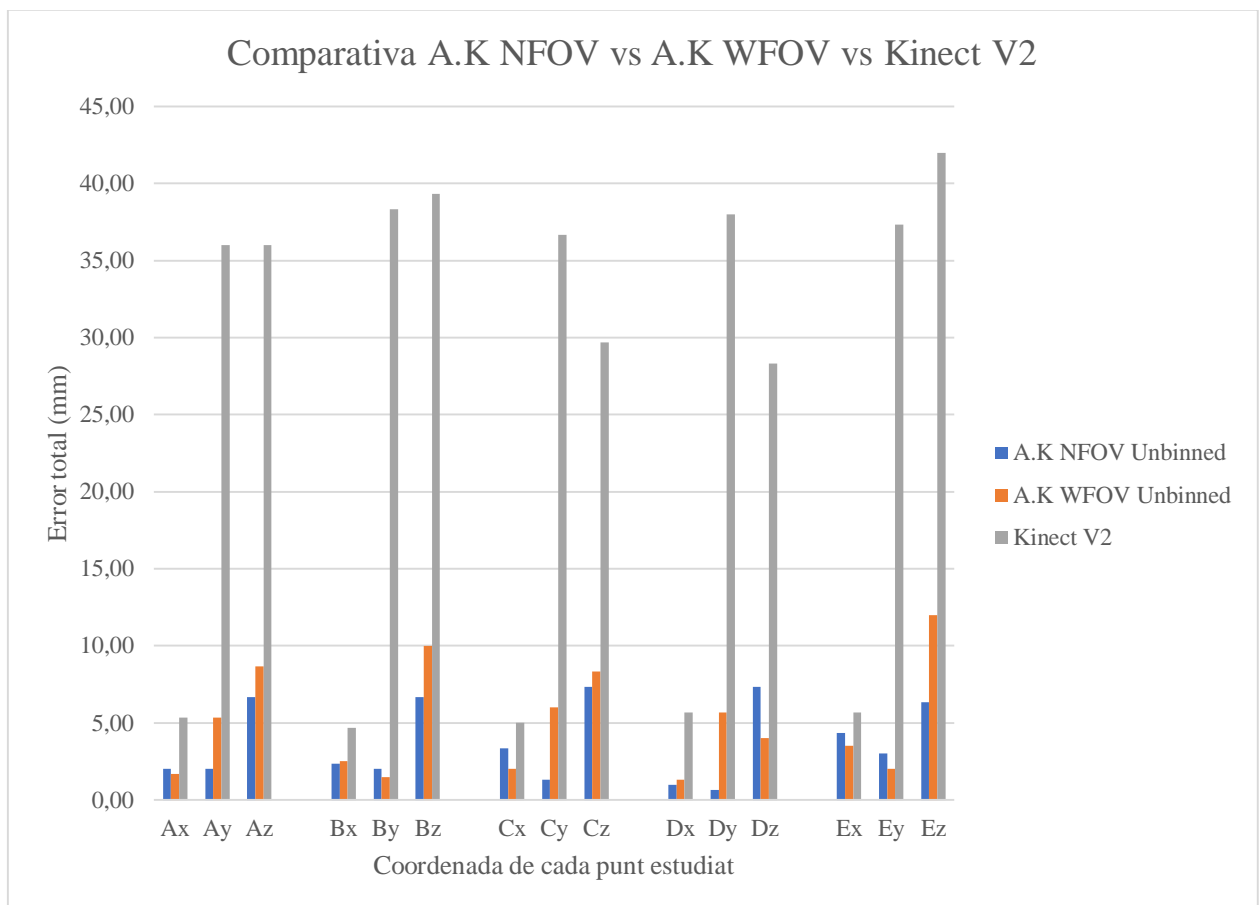


Figura 74 Comparativa de l'error per punt, de les càmeres i modes, per les coordenades de cada punt.

És important comentar errors que s'han pogut cometre durant la realització del assaig amb el que s'han obtingut aquests resultats:

- Errors al mesurar manualment les posicions teòriques dels punts del taulell d'escacs i de l'origen de la càmera. Les coordenades s'han mesurat amb el metre, el mesurador làser i a partir d'algunes diferències entre cotes conegudes, per tant és fàcil que s'hagi comés algun error d'arrodoniment a l'hora de prendre aquestes mesures.
- Errors al mantenir centrat l'origen de la càmera amb l'eix vertical del taulell. Sí que es cert que s'ha assegurat amb el mesurador làser que el muntatge es mantenia centrat, però no s'ha pogut fer de forma perfecta, per tant, cap la possibilitat de que hi hagi alguna lleugera desviació que afecti als resultats.
- Errors d'arrodoniment al extreure les mesures del CloudCompare per realitzar les taules i gràfiques vistes anteriorment.
- Error de precisió a l'hora de seleccionar al CloudCompare els punts dels que es volen saber les dades, en el núvol de punts generat. Òbviament, per cada captura es genera una gran quantitat de punts i seleccionar exactament el que es vol és complicat i més tenint en compte que a mesura que s'augmenta la distància del taulell d'escacs, la resolució és pitjor. Per tant, això pot comportar també lleugers errors en els resultats obtinguts.
- Els errors sistemàtic i aleatoris (relacionats amb els errors de precisió i exactitud) de la Azure Kinect que s'han explicat en l'apartat de calibratge d'aquesta càmera, així com també l'error que pugui cometre la Kinect V2 al fer les captures.
- Errors produïts pel propi entorn en que s'ha realitzat l'assaig. Com s'ha vist en l'apartat de calibratge, hi ha una sèrie de píxels que són invalidats per la Azure Kinect.
- Errors per interferència de llum exterior que s'hagi pogut filtrar en la habitació. S'ha fet el possible per aïllar de llum exterior la habitació en que s'ha fet l'assaig, però sí que cap la possibilitat que algun raig de llum exterior s'hagi filtrat i hagi causat algun lleuger error que hagi afectat als resultats obtinguts.
- Errors en el posicionament de la Kinect V2, ja que el seu objectiu de la càmera de profunditat no està justament a la superfície sinó que es troba dins de la carcassa de la pròpia màquina (**Figura 14**), per tant les mesures de posicionament del blanc respecte la càmera s'han hagut de corregir.

7.2.3 Discussió dels resultats

Primerament es discutiran els resultats obtinguts amb la Azure Kinect pel que fa a l'error per distància:

- Observant la **Figura 71** es pot veure que el mode NFOV Unbinned presenta un error per distància més elevat en la coordenada z. En aquesta coordenada es té un error més alt en la gran majoria de distàncies i té un comportament més irregular, que no pas per les coordenades x i y.

Les coordenades x i y tenen un comportament bastant semblant i regular on es pot veure que l'error va augmentant a mesura que augmenta la distància, fent el pic de major error als 4 m de distància i partir d'aquí hi ha una lleugera caiguda d'aquest error.

Tot i tenir un comportament general bastant semblant en les coordenades x i y, és possible apreciar que per a distàncies més properes a la càmera, l'error que es produeix és inferior en la coordenada y, mentre que per distàncies més grans l'error en la coordenada x és inferior al de la y.

Aquest mode de profunditat, com s'ha comentat anteriorment, està dissenyat per captures a un rang mig i llarg de la càmera, per aquest motiu es que es poden prendre captures a tanta distància tenint un error per distància màxim de entre totes les coordenades de poc més de 12 mm, cosa que el fa un error molt acceptable tenint en compte que s'arriben a fer captures de distàncies de 5,36 m. A més, poder treballar amb tantes distàncies, fa que es puguin fer més mesures i per tant, observar millor el comportament de la càmera amb la distància, cosa que amb el mode WFOV no es possible.

- Observant la **Figura 72** es pot veure que el mode WFOV Unbinned presenta un error per distància en la coordenada z més elevat que en x i y, per a distàncies de 0,5 m i 1 m. En canvi, per a una distància de 2 m la coordenada y és la que supera a les altres dos en l'error.

Les coordenades x i y es troben bastant parelles pel que fa a distàncies de 0,5 m i 1 m, però com s'ha dit anteriorment, per a 2 m, en la coordenada y es dispara l'error. Tot i això, igual que per al mode NFOV Unbinned, l'error més gran que es té entre totes les coordenades, és de poc més de 12 mm, el qual és un error molt acceptable.

El fet de que aquest mode de profunditat tingui un rang tan limitat fa que les mesures de distància que es puguin prendre també siguin limitades. Com s'ha dit anteriorment, és un mode pensat per tenir amplitud de imatge, més que de profunditat i això es veu reflectit en els resultats, on les

coordenades y i z que estan més relacionades amb la profunditat, tenen un error generalment superior al de la coordenada x , la qual està més relacionada amb l'amplitud de la imatge. Per aquest motiu l'error de la coordenada x té un comportament més regular i les altres dos coordenades són més irregulars.

- Comparant els resultats d'error per distància obtinguts amb els dos modes de profunditat, sembla que per a estudis posteriors que es vulguin fer amb aquesta càmera, així com per l'assaig en exterior, el mode NFOV Unbinned és millor opció, ja que permet treballar amb més varietat de distàncies amb un error relativament baix. A més, tampoc es que es sacrifiqui molta precisió al cobrir major distància, ja que amb els dos modes s'ha obtingut un error màxim entre totes les coordenades, de poc més de 12 mm.

A continuació es discutiran els resultats obtinguts amb la Kinect V2 pel que fa a l'error per distància:

- Observant la **Figura 73**, és possible veure que l'error afecta clarament a les coordenades y i z , mentre que per la coordenada x és té un error més baix i regular en totes les distàncies.

Les coordenades y i z mostren clarament que el error augmenta a mesura que s'augmenta la distància. Sembla clar que aquesta càmera està dissenyada per cobrir rangs de curta i mitja distància, ja que a llarga distància s'acaba acumulant massa error tant de la coordenada y com de la z .

- Comparant aquesta càmera amb els dos modes de la Azure Kinect, sens dubte és la que obté pitjor resultats pel que fa a l'error per distància. Tot i això, era l'esperat ja que es tracta d'un model previ a la Azure Kinect, que tot i poder cobrir rangs superiors al mode WFOV Unbinned, no arriba als que cobreix el NFOV Unbinned.

A més, l'error per distància màxim entre totes les coordenades per aquesta càmera, arriba a una mica més de 60 mm, que és aproximadament cinc vegades l'error màxim obtingut amb qualsevol dels dos modes de la Azure Kinect.

Per finalitzar es compararan les dos càmeres i els diferents modes de profunditat pel que fa l'error per punt a partir de la **Figura 74**:

- La Azure Kinect amb el mode NFOV Unbinned presenta un error baix i regular en totes les coordenades de cada punt. Cap dels seus errors totals supera els 10 mm cosa que fa que sigui un resultat molt acceptable.
- La Azure Kinect amb el mode WFOV Unbinned també presenta un error baix, però es pot observar que en la coordenada z de la majoria de punts es té un error major que en les altres coordenades. Això fa que tingui uns errors puntuals superiors als 10 mm, cosa que fa que aquest mode presenti pitjors resultats que el NFOV Unbinned.
- La Kinect V2 sens dubte presenta errors molt superiors en totes les coordenades de tots els punts. Tot i això, en les coordenades x el màxim que s'arriba és a estar lleugerament per sobre dels 5 mm de error, però en les coordenades y i z de cada punt, l'error es disparà a valors per sobre de 40 mm, valor que ja no es tan acceptable.

El resum de la discussió que se n'extreu és el següent:

- La Azure Kinect dona clarament millors resultats que la Kinect V2. Els modes NFOV i WFOV tenen errors per distància i per punt, bastant inferiors als de la Kinect V2, cosa esperada ja que la Azure Kinect es va dissenyar des d'un punt de vista més professional que no pas la Kinect V2, pensada per videojocs.
- Pel que fa als modes de profunditat de la Azure Kinect, sembla clar que el mode NFOV Unbinned és millor, no sol per la distància de profunditat a la que permet arribar, sinó també per que ho fa amb uns errors molt semblants als de la WFOV Unbinned, que tenen un valor màxim de 12 mm, errors més que acceptables donades les condicions i les eines amb que s'ha fet aquest assaig.
- Per tant, la Azure Kinect amb el mode NFOV Unbinned és la configuració triada per fer l'assaig a l'exterior, on les condicions de llum no són controlades.

7.3 Exactitud i precisió

Abans de realitzar l'assaig en exterior, s'ha volgut realitzar unes últimes proves en interior per tal de veure l'exactitud i la precisió de la Azure Kinect i comparar-la amb la Kinect V2.

Primerament és important definir que són aquests dos conceptes (la **Figura 75** permet veure de manera gràfica la diferència entre exactitud i precisió):

- **Exactitud:** Es refereix a com de proper es troba un valor mesurat del valor real. En termes estadístics, l'exactitud està relacionada amb el biaix d'una estimació. Com menor és el biaix, més exacta és una estimació. Quan s'expressa l'exactitud d'un resultat, es fa mitjançant la diferència entre el valor experimental i el valor real.
- **Precisió:** Es refereix a la dispersió d'un conjunt de valors obtinguts de mesuraments repetits d'una magnitud. Com menor és la dispersió, major és la precisió. Una mesura comú en la variabilitat és la desviació estàndard de les mesures i la precisió es pot estimar com una funció d'aquesta. És important ressaltar que l'automatització de diferents proves o tècniques pot produir un augment en la precisió, ja que amb l'automatització el que s'aconsegueix és una disminució dels errors manuals a partir de l'experiència obtinguda en el procés de repetició. També cal aclarir que la precisió és un concepte diferent al de resolució, i no s'han de confondre.

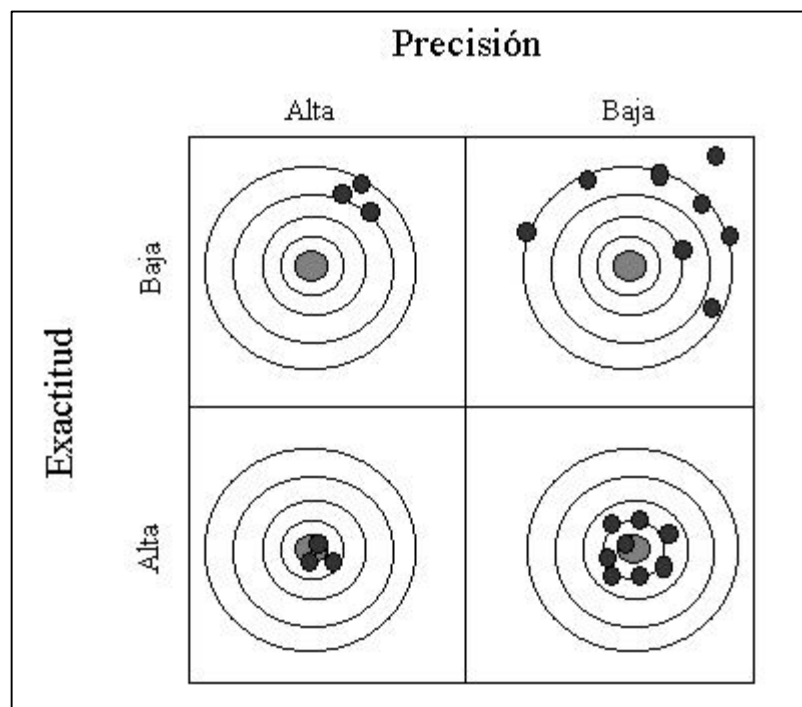


Figura 75 Comparativa gràfica entre exactitud i precisió (Font: *Cómo sabemos*, 2015).

A partir d'aquí, s'ha decidit utilitzar la metodologia de l'assaig d'interior realitzat anteriorment, per calcular la exactitud i la precisió de la Azure Kinect amb el mode seleccionat per fer els assajos en exterior (el NFOV Unbinned), així com també calcular la exactitud i precisió de la Kinect V2 per comparar les càmeres entre elles.

Per tant, la idea és la mateixa que en l'assaig d'interior vist prèviament, es realitzaran captures d'un blanc a diferents distàncies de les càmeres i, d'una sèrie de punts marcats en el blanc, s'obtidran les seves coordenades de manera que es pugui calcular el mòdul de la distància. Existeixen tres diferències respecte l'assaig realitzar prèviament:

- Ara s'utilitzaran dos blancs, un serà el taulell d'escacs utilitzat anteriorment, amb els mateixos punts (A, B, C, D i E), i el segon blanc serà un taulell de cartró de les mateixes dimensions que el taulell d'escacs, i amb els mateixos punts, marcats en la mateixa posició (**Figura 76**). La idea de fer això és poder comparar els resultats de precisió i exactitud del taulell d'escacs i de cartró amb cada càmera, per tal de veure si el canvi de material o de tipus de superfície del blanc té algun efecte (tal i com ja s'havia comentat que podia succeir al estudiar el fenomen dels *mixed pixels*, en el calibratge de la Azure Kinect).
- Degut a l'entorn en que s'ha realitzat aquesta prova de exactitud i precisió, només ha estat possible obtenir mesures a distàncies de 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m, 2,0 m i 2,5 m, en un muntatge semblant al realitzat en l'anterior assaig (**Figura 64**). Com a treballs futurs seria preferible comprovar aquests paràmetres estudiats a majors distàncies.
- El càlcul de precisió i exactitud implica realitzar diverses repeticions de l'experiment. Per tant, s'ha decidit realitzar deu captures a cada distància, per a cada blanc i per cada càmera.

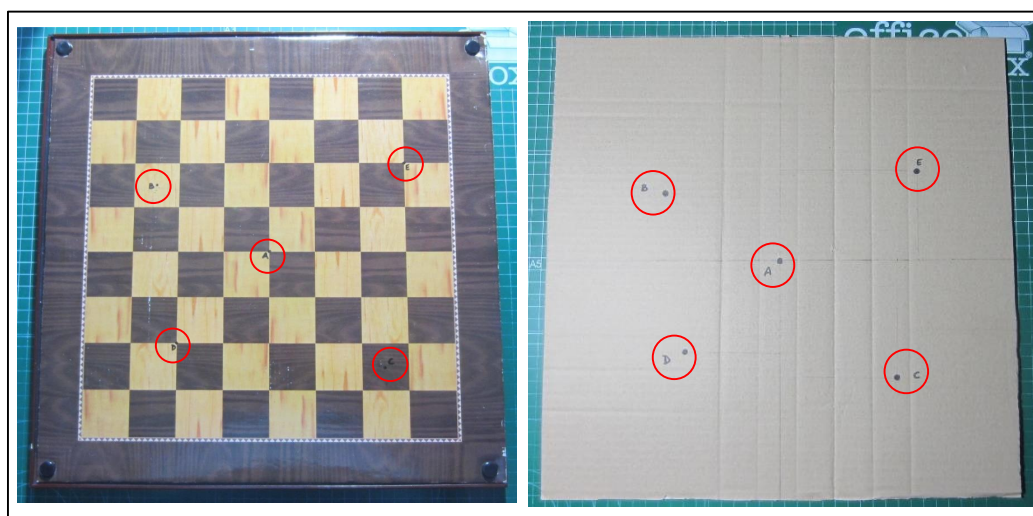


Figura 76 Esquerra: Blanc 1 (Taulell escacs). Dreta: Blanc 2 (Taulell cartró). En vermell s'indiquen els punts estudiats.

Així doncs, de cada coordenada de cada punt s'ha calculat el mòdul de la distància com la suma quadràtica de cada coordenada. Això s'ha fet per cada repetició.

A partir d'aquí s'ha calculat l'exactitud de cada punt com la diferència entre el mòdul de la distància real a la que està un punt respecte la càmera, amb la mitja simple dels mòduls de les distàncies obtingudes de les mesures de les coordenades d'un punt al llarg de totes les repeticions. L'expressió (11) ha sigut la utilitzada per calcular l'exactitud de cada punt, de cada blanc, a una determinada distància.

$$\text{exactitud} = \text{mòdul distància real} - \text{mitja mòduls} \quad (11)$$

$$\text{On } \text{mitja mòduls} = \frac{\sum_{i=1}^{n^{\circ} \text{ de repeticions}} (\text{mòdul distància mesurada}_i)}{n^{\circ} \text{ de repeticions}}$$

Seguidament s'ha pogut representar la precisió a partir de la desviació estàndard. Aquesta desviació estàndard s'ha calculat per cada punt de cada blanc a una determinada distància, a partir de les repeticions realitzades, mitjançant l'expressió (12).

$$\text{desviació estàndard} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n^{\circ} \text{ de repeticions}} (\text{mòdul repetició}_i - \text{mitja mòduls})^2}{n^{\circ} \text{ de repeticions} - 1}} \quad (12)$$

D'aquesta manera, la precisió en cada punt a cada distància estudiada i per a cada blanc es pot representar com la mitja simple dels mòduls de la distància obtinguda de les coordenades mesurades, acompanyada de la desviació estàndard obtinguda, tal com es mostra en l'expressió (13).

$$\text{precisió} = \text{mitja mòduls} \pm \text{desviació estàndard} \quad (13)$$

A continuació es mostren unes taules resum (**Taules 25-44**) amb els paràmetres calculats per obtenir l'exactitud i la precisió (les taules expandides de les repeticions realitzades es poden veure en els Annexos d'aquest estudi).

A partir de les taules resum (**Taules 25-28**), ha estat possible realitzar una representació gràfica que permet veure l'evolució de l'exactitud i la precisió (desviació estàndard) amb la distància a la que es troba el blanc respecte la càmera (**Figures 77-86**).



Taula 25 Resultats de precisió i exactitud amb el taulell d'escacs i la Azure Kinect (NFOV Unbinned).

Distància	Paràmetre	Blanc 1 amb Azure Kinect (NFOV Unbinned)				
		A	B	C	D	E
0,5 m	Mòduls reals (mm)	502,49	520,07	510,76	506,12	527,63
	Precisió (mm)	498,12±0,42	515,16±0,61	508,04±0,52	498,69±0,46	527,85±0,37
	Exactitud (mm)	4,37	4,91	2,72	7,42	-0,22
1,0 m	Mòduls reals (mm)	1001,25	1010,19	1005,42	1003,07	1014,10
	Precisió (mm)	999,19±0,48	1012,84±0,52	1000,08±1,23	996,08±0,82	1017,69±0,63
	Exactitud (mm)	2,06	-2,66	5,34	7,00	-3,59
1,5 m	Mòduls reals (mm)	1500,83	1506,81	1503,62	1502,05	1509,43
	Precisió (mm)	1513,75±1,12	1529,80±0,73	1500,09±1,13	1512,30±0,99	1527,09±0,99
	Exactitud (mm)	-12,92	-22,99	3,53	-10,25	-17,66
2,0 m	Mòduls reals (mm)	2000,62	2005,11	2002,72	2001,54	2007,09
	Precisió (mm)	2011,95±0,82	2027,72±1,39	2000,31±0,74	2005,49±1,42	2020,96±1,19
	Exactitud (mm)	-11,33	-22,60	2,41	-3,96	-13,87
2,5 m	Mòduls reals (mm)	2500,50	2504,09	2502,17	2501,23	2505,67
	Precisió (mm)	2512,49±1,21	2525,15±1,30	2500,49±1,58	2506,34±1,94	2515,96±2,11
	Exactitud (mm)	-11,99	-21,06	1,69	-5,11	-10,29



Taula 26 Resultats de precisió i exactitud amb el taulell de cartró i la Azure Kinect (NFOV Unbinned).

Distància	Paràmetre	Blanc 2 amb Azure Kinect (NFOV Unbinned)				
		A	B	C	D	E
0,5 m	Mòduls reals (mm)	502,49	520,07	510,76	506,12	527,63
	Precisió (mm)	504,84±0,71	523,49±0,06	512,56±0,31	504,04±0,51	540,15±0,97
	Exactitud (mm)	-2,35	-3,42	-1,80	2,08	-12,54
1,0 m	Mòduls reals (mm)	1001,25	1010,19	1005,42	1003,07	1014,10
	Precisió (mm)	1006,72±0,79	1019,43±1,20	1006,21±0,46	1005,19±0,84	1029,63±0,98
	Exactitud (mm)	-5,47	-9,24	-0,78	-2,12	-15,53
1,5 m	Mòduls reals (mm)	1500,83	1506,81	1503,62	1502,05	1509,43
	Precisió (mm)	1531,36±1,42	1546,58±0,93	1518,95±0,96	1523,15±1,03	1550,12±1,06
	Exactitud (mm)	-30,53	-39,77	-15,33	-21,10	-40,69
2,0 m	Mòduls reals (mm)	2000,62	2005,11	2002,72	2001,54	2007,09
	Precisió (mm)	2014,86±1,37	2027,03±1,25	2010,85±1,18	2013,15±0,67	2028,45±1,31
	Exactitud (mm)	-14,23	-21,92	-8,13	-11,61	-21,37
2,5 m	Mòduls reals (mm)	2500,50	2504,09	2502,17	2501,23	2505,67
	Precisió (mm)	2523,90±1,63	2540,34±1,28	2507,72±1,51	2514,57±1,40	2539,74±1,82
	Exactitud (mm)	-23,40	-36,25	-5,54	-13,34	-34,07

Taula 27 Resultats de precisió i exactitud amb el taulell d'escacs i la Kinect V2.

Distància	Paràmetre	Blanc 1 amb Kinect V2				
		A	B	C	D	E
0,5 m	Mòduls reals (mm)	528,38	541,98	541,42	535,93	548,25
	Precisió (mm)	536,25±0,95	549,94±1,21	545,92±1,05	536,60±1,07	562,79±1,53
	Exactitud (mm)	-7,88	-7,97	-4,50	-0,68	-14,54
1,0 m	Mòduls reals (mm)	1028,19	1035,25	1034,96	1032,09	1038,55
	Precisió (mm)	1051,83±0,97	1073,75±1,28	1051,02±0,94	1049,70±1,63	1064,52±2,01
	Exactitud (mm)	-23,63	-38,50	1,82	-17,61	-25,97
1,5 m	Mòduls reals (mm)	1528,13	1532,89	1532,69	1530,76	1535,11
	Precisió (mm)	1546,57±1,43	1571,29±1,53	1525,67±1,27	1540,51±1,88	1563,20±1,81
	Exactitud (mm)	-18,43	-38,41	7,02	-9,75	-28,09
2,0 m	Mòduls reals (mm)	2028,10	2031,68	2031,54	2030,08	2033,37
	Precisió (mm)	2064,06±0,84	2078,48±1,93	2046,97±1,55	2054,07±2,33	2080,45±2,03
	Exactitud (mm)	-35,97	-46,80	-15,43	-23,99	-47,08
2,5 m	Mòduls reals (mm)	2528,08	2530,96	2530,84	2529,67	2532,31
	Precisió (mm)	2552,40±2,20	2570,13±2,00	2534,59±3,34	2543,12±2,87	2566,40±2,53
	Exactitud (mm)	-24,32	-39,18	-3,75	-13,45	-34,09

Taula 28 Resultats de precisió i exactitud amb el taulell de cartró i la Kinect V2.

Distància	Paràmetre	Blanc 2 amb Kinect V2				
		A	B	C	D	E
0,5 m	Mòduls reals (mm)	528,38	541,98	541,42	535,93	548,25
	Precisió (mm)	N/A	543,32±1,86	N/A	N/A	554,15±1,78
	Exactitud (mm)	N/A	-1,35	N/A	N/A	-5,90
1,0 m	Mòduls reals (mm)	1028,19	1035,25	1034,96	1032,09	1038,55
	Precisió (mm)	1049,79±1,83	1065,31±1,82	1044,06±1,37	1050,07±1,85	1069,64±1,90
	Exactitud (mm)	-21,59	-30,06	-9,10	-17,98	-31,09
1,5 m	Mòduls reals (mm)	1528,13	1532,89	1532,69	1530,76	1535,11
	Precisió (mm)	1568,22±1,17	1581,25±2,03	1558,76±1,03	1564,36±1,49	1583,23±0,91
	Exactitud (mm)	-40,08	-48,37	-26,07	-33,60	-48,12
2,0 m	Mòduls reals (mm)	2028,10	2031,68	2031,54	2030,08	2033,37
	Precisió (mm)	2071,02±1,52	2078,60±1,94	2065,67±1,55	2069,32±1,84	2087,51±1,92
	Exactitud (mm)	-42,92	-46,91	-34,14	-39,24	-54,14
2,5 m	Mòduls reals (mm)	2528,08	2530,96	2530,84	2529,67	2532,31
	Precisió (mm)	2577,88±1,85	2595,71±2,70	2558,93±2,53	2562,76±1,66	2601,37±2,10
	Exactitud (mm)	-49,80	-64,76	-26,28	-33,09	-69,06

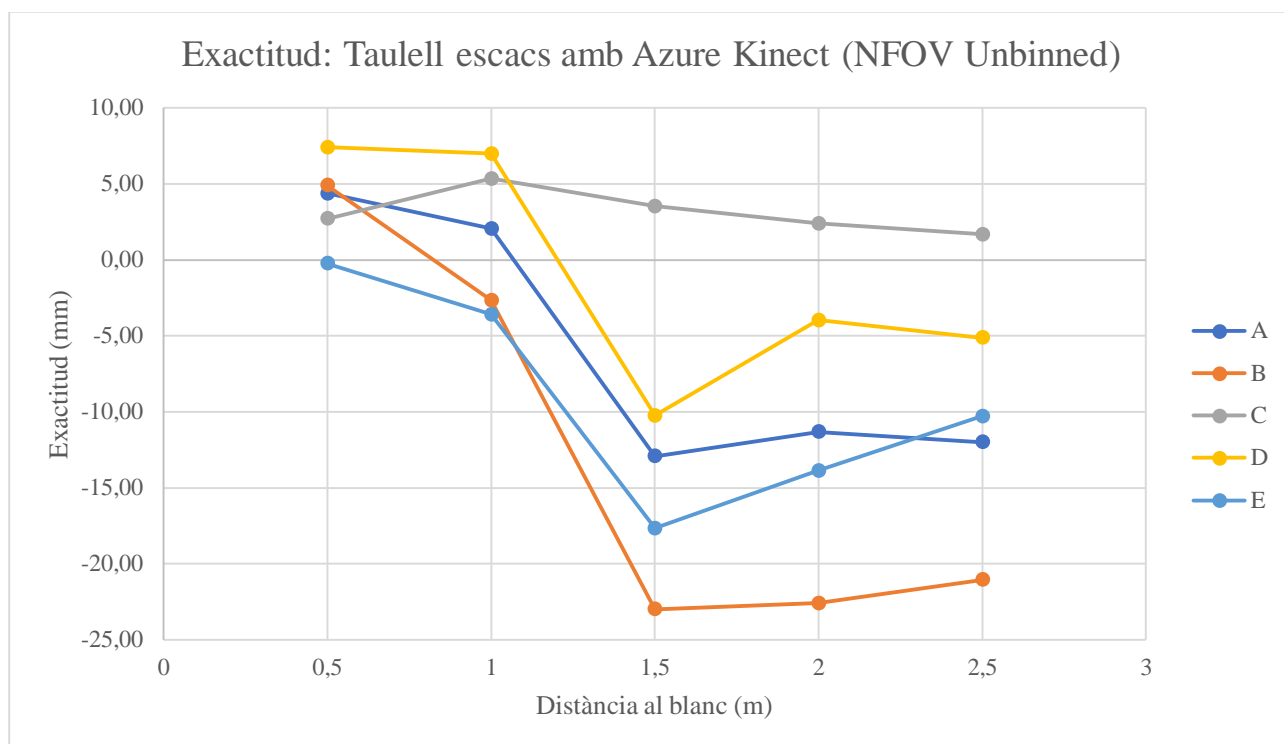


Figura 77 Gràfic de l'evolució de l'exactitud amb la distància, del blanc 1 amb la Azure Kinect.

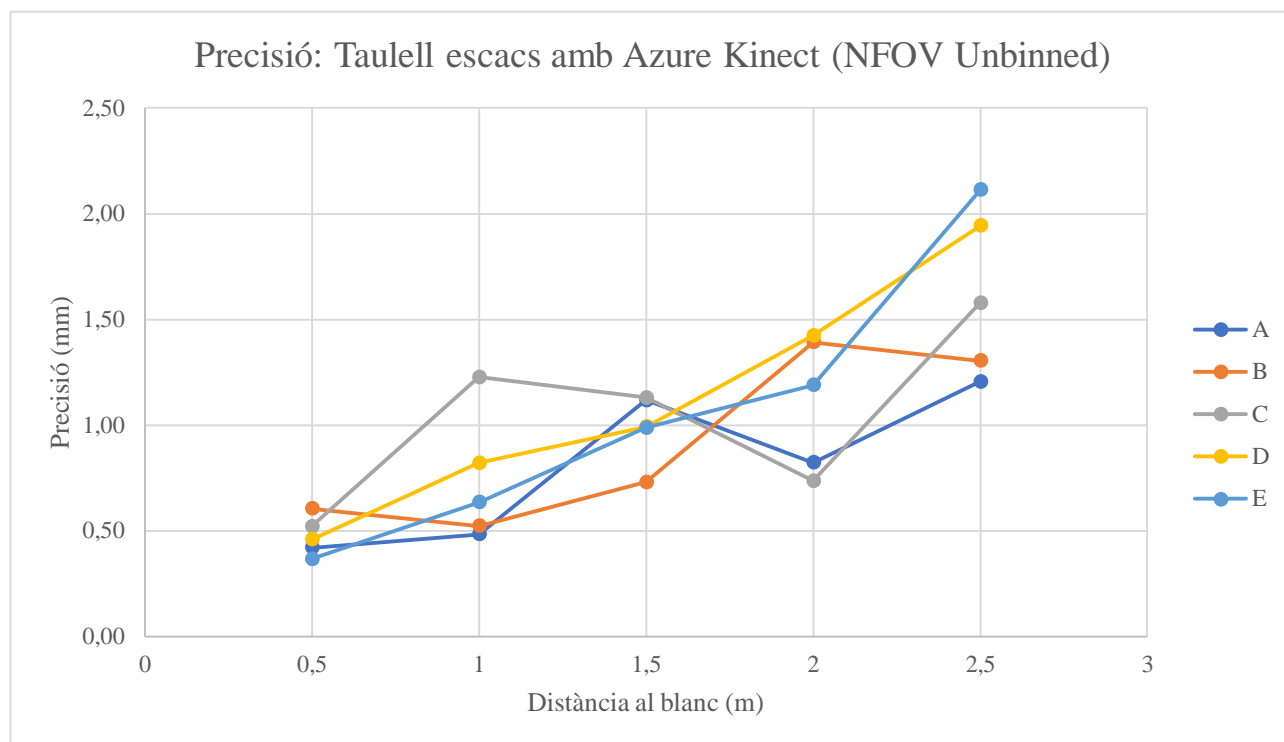


Figura 78 Gràfic de l'evolució de la precisió (desviació estàndard) amb la distància, del blanc 1 amb la Azure Kinect.

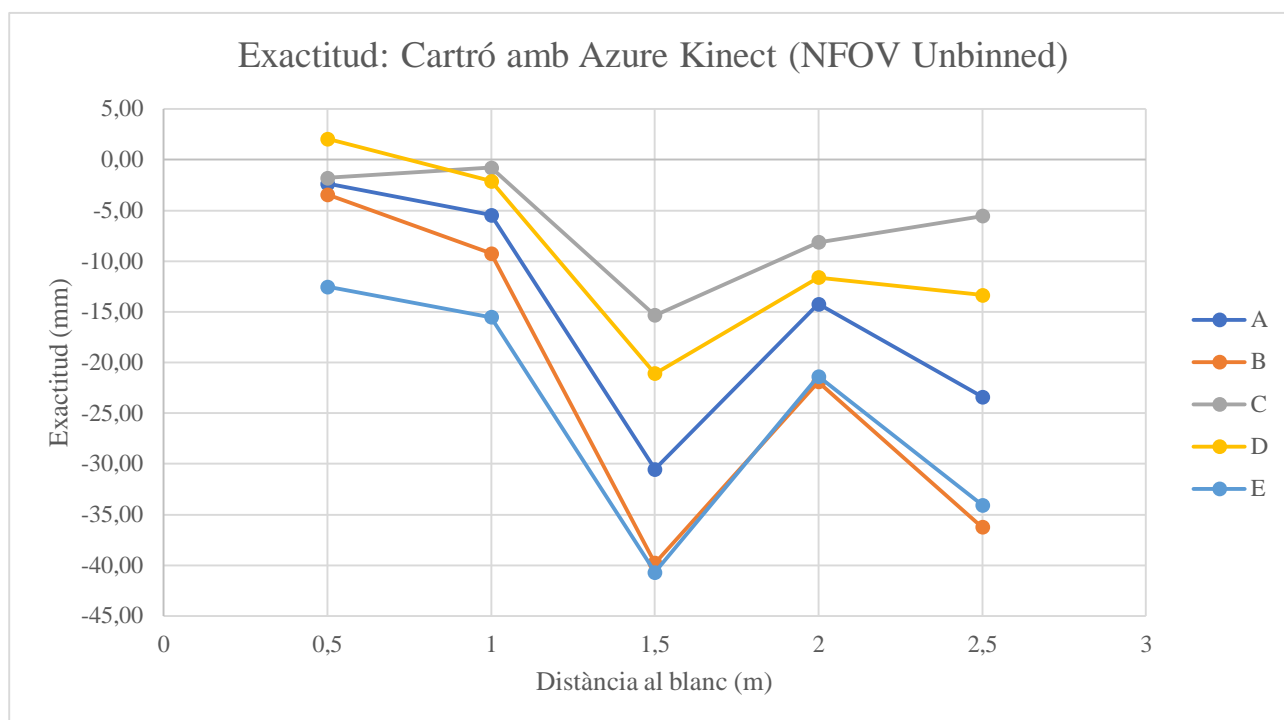


Figura 79 Gràfic de l'evolució de l'exactitud amb la distància, del blanc 2 amb la Azure Kinect.

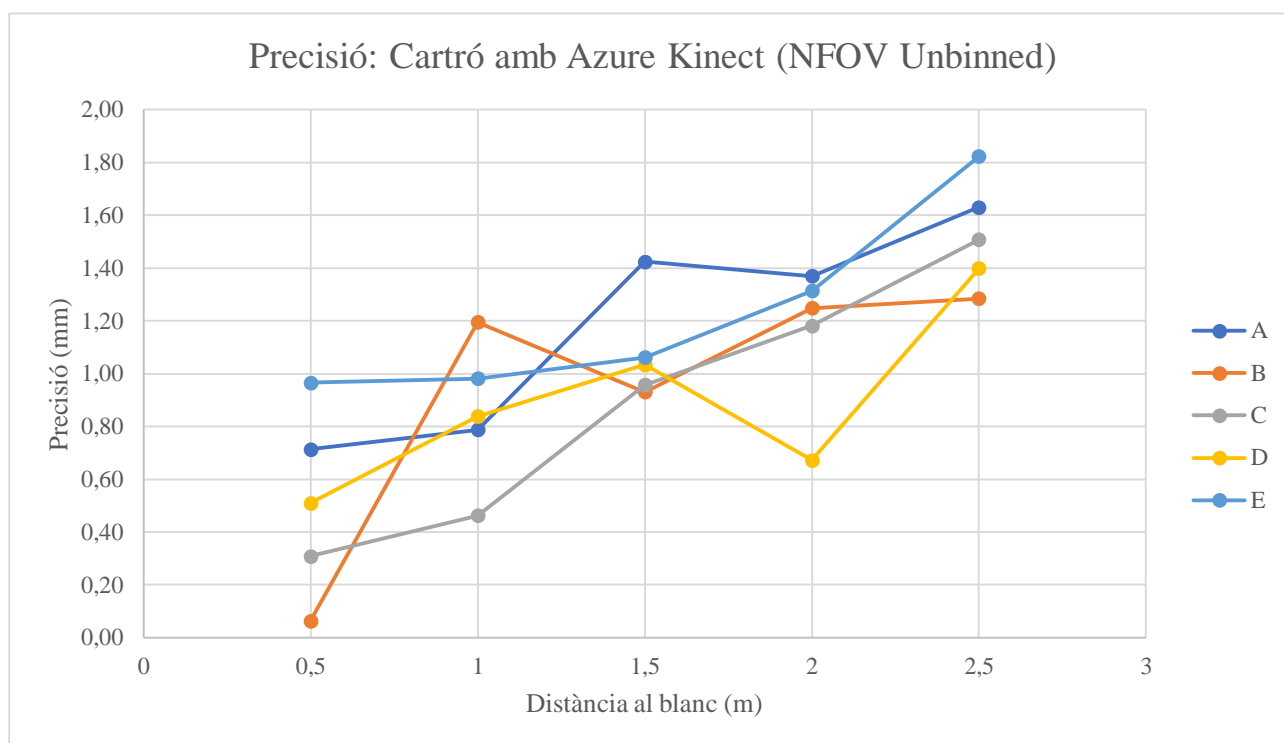


Figura 80 Gràfic de l'evolució de la precisió (desviació estàndard) amb la distància, del blanc 2 amb la Azure Kinect.

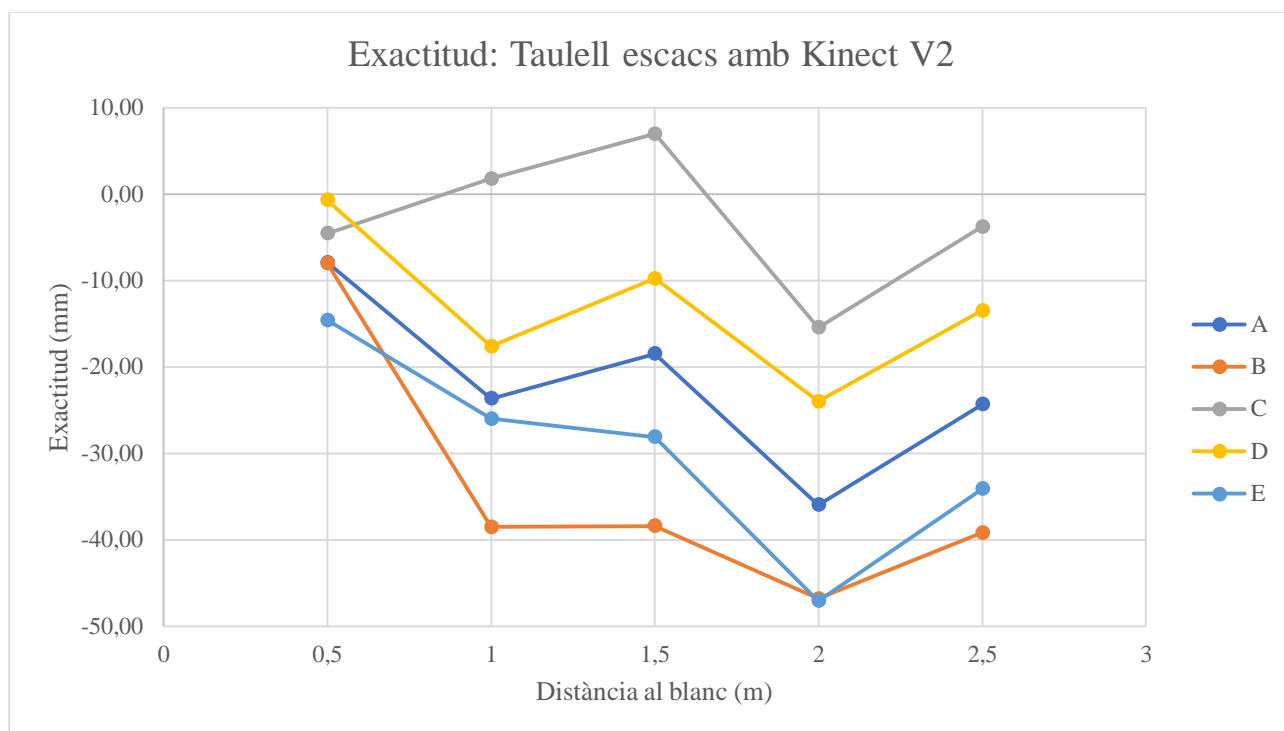


Figura 81 Gràfic de l'evolució de l'exactitud amb la distància, del blanc 1 amb la Kinect V2.

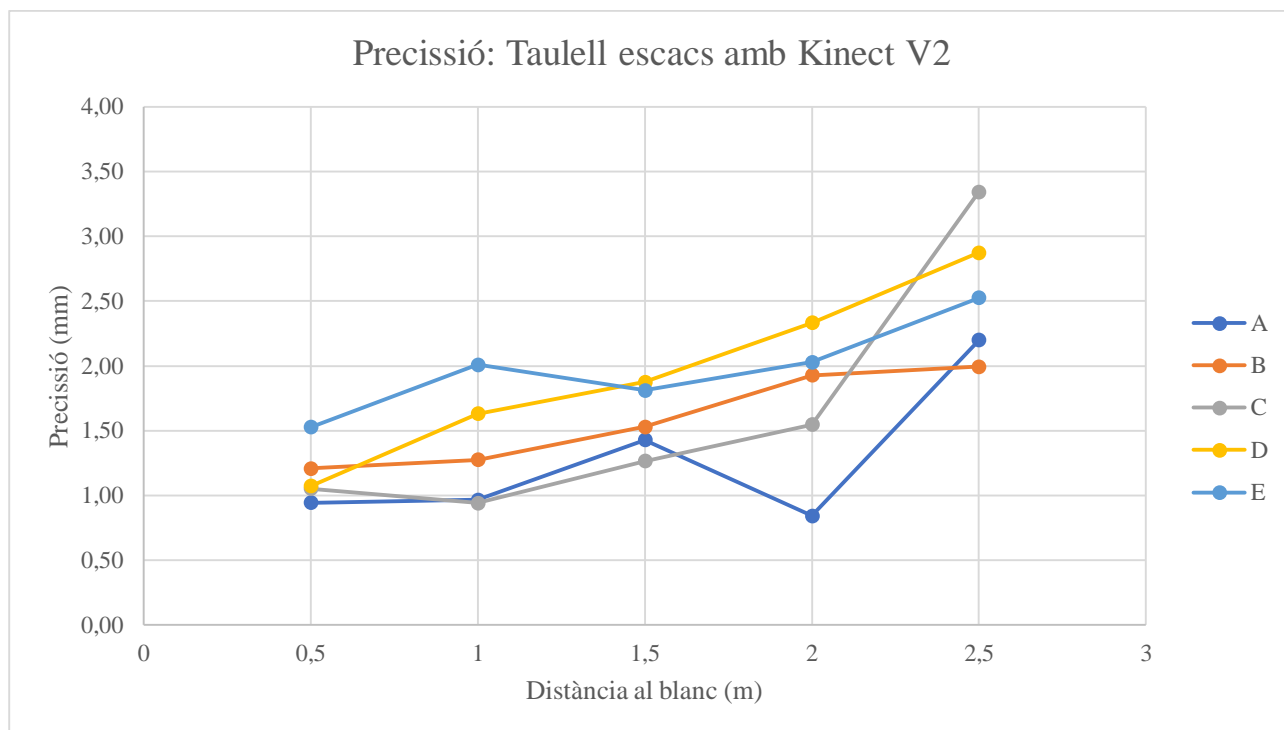


Figura 82 Gràfic de l'evolució de la precisió (desviació estàndard) amb la distància, del blanc 1 amb la Kinect V2.

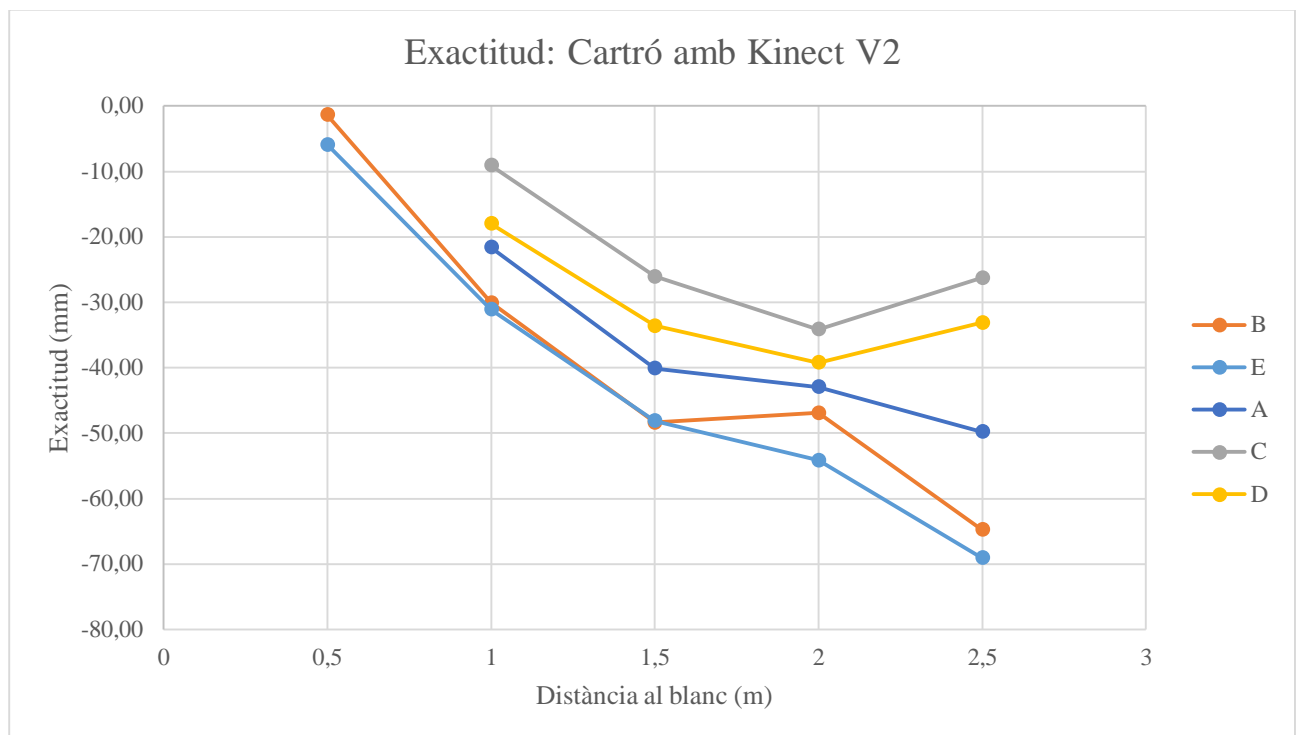


Figura 83 Gràfic de l'evolució de l'exactitud amb la distància, del blanc 2 amb la Kinect V2.

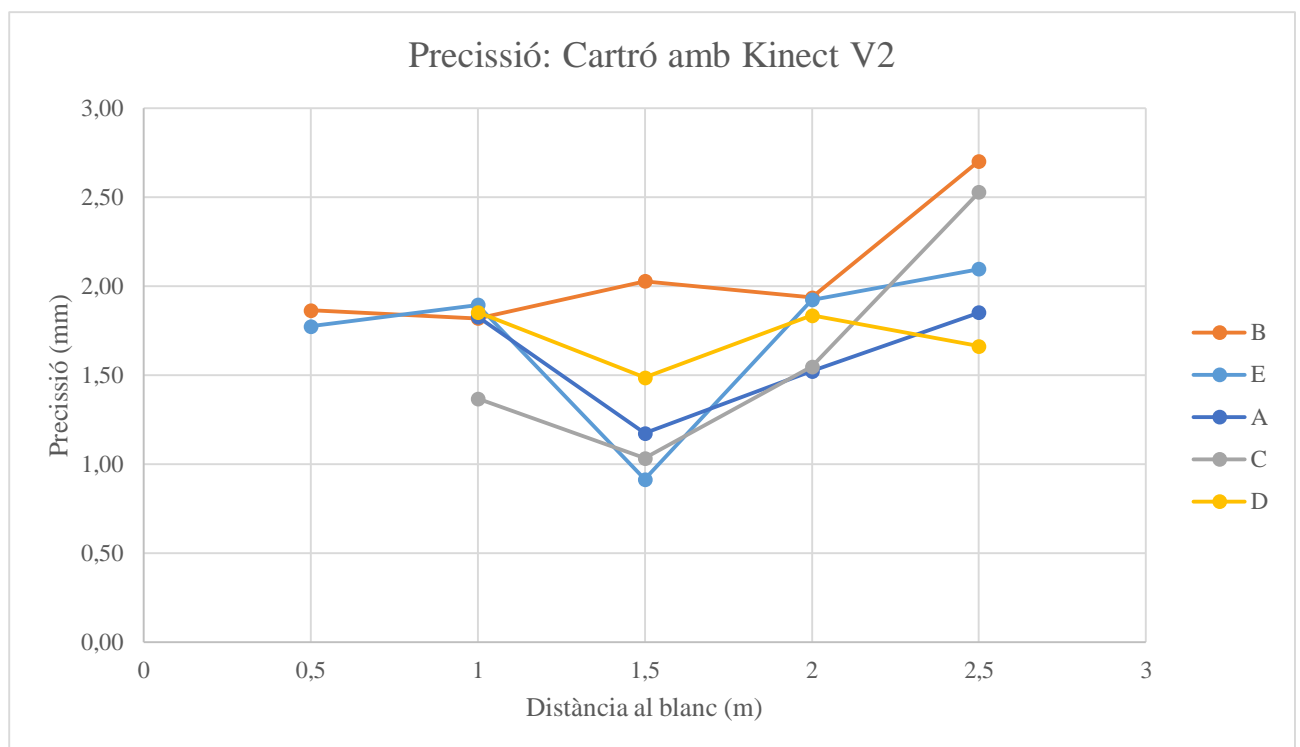


Figura 84 Gràfic de l'evolució de la precisió (desviació estàndard) amb la distància, del blanc 1 amb la Kinect V2.

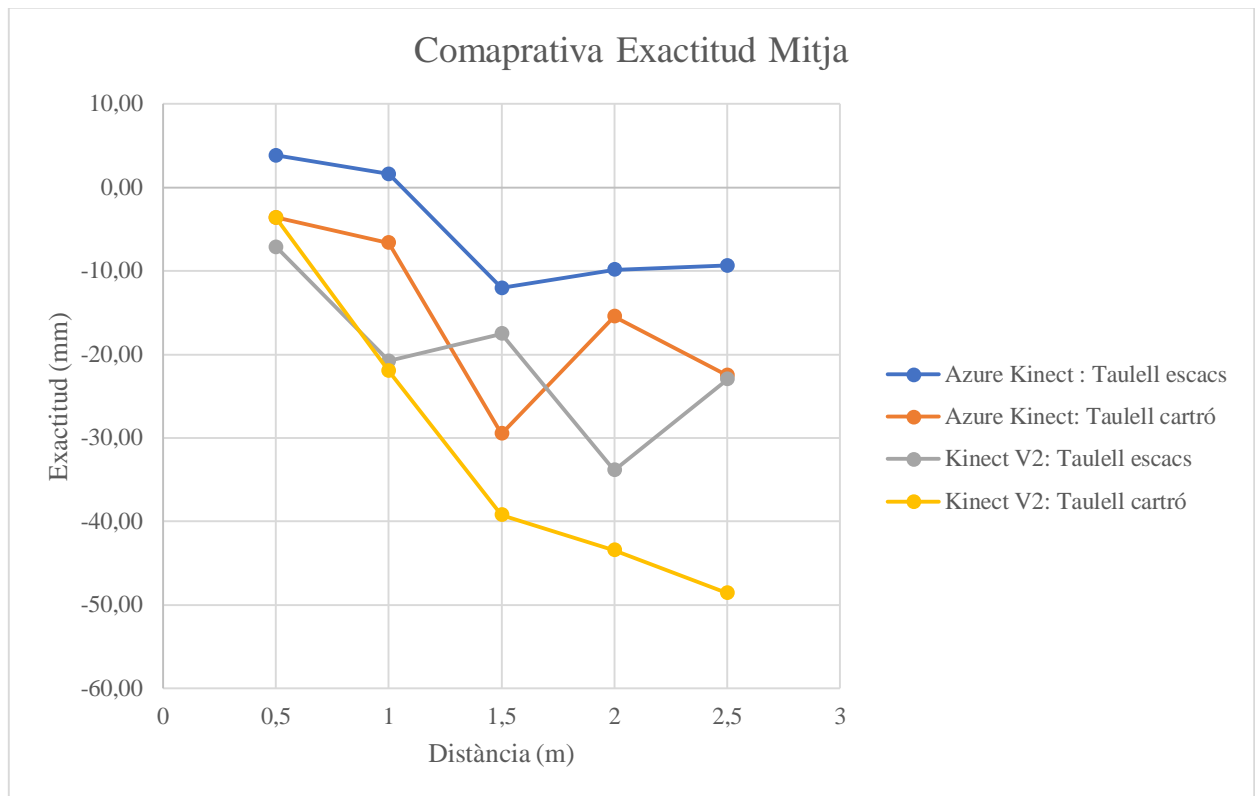


Figura 85 Gràfic comparatiu de l'exactitud mitja per cada càmera i blanc.

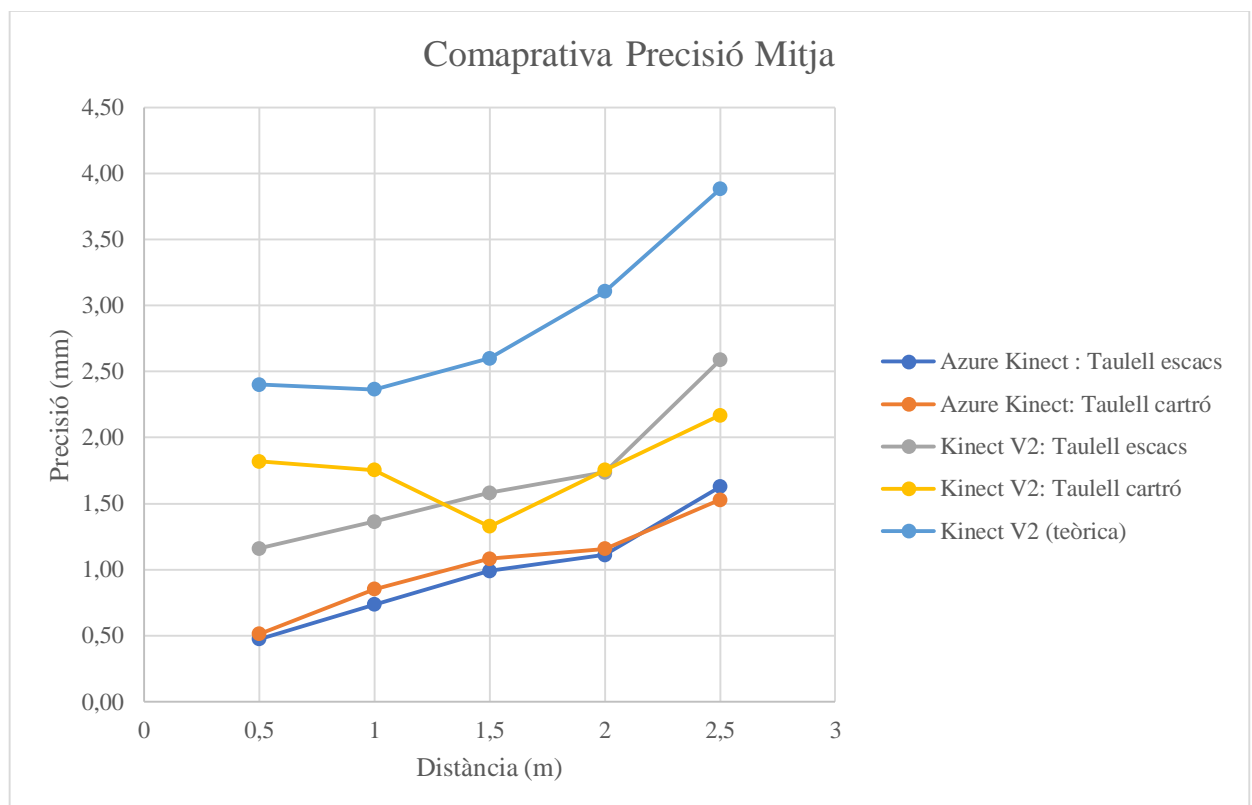


Figura 86 Gràfic comparatiu de la precisió mitja per cada càmera i blanc. També s'inclou una corba teòrica de referència per la Kinect V2.

Analitzant aquests resultats s'ha pogut observar que:

- La Azure Kinect amb el mode NFOV Unbinned presenta en tots els punts del resultats d'exactitud, una tendència a augmentar negativament fins arribar als 1,5 m de distància amb el blanc 1 (**Taula 25; Figura 77**). A partir d'aquí sembla que es manté una diferència entre la distància real i la mesurada més constant. Pel que fa a l'exactitud d'aquesta càmera amb el blanc 2 (**Taula 26; Figura 79**), sembla que segueix la mateixa tendència que amb el blanc 1, però a partir dels 1,5 que és on fa el pic de valor màxim negatiu, per a 2 m i 2,5 m torna a valors negatius més baixos. Tot i això, en el blanc 2 es tenen pèrdues d'exactitud màximes (aproximadament arriba a -40 mm) majors que no pas les màximes amb el blanc 1 (valors entre -20 i -25 mm). Per tant sembla que per aquesta càmera, una superfície com la del taulell d'escacs generalment dona millors resultats pel que fa l'exactitud.
- La Azure Kinect amb el mode NFOV Unbinned presenta en tots el punts, tant pel blanc 1 (**Taula 26; Figura 78**) com pel blanc 2 (**Taula 26; Figura 80**), un creixement de la desviació estàndard, és a dir, una pèrdua de precisió, a mesura que s'augmenta la distància. Per als dos blancs la desviació estàndard màxima que s'obté està al voltant dels 2 mm, per tant sembla que per aquesta càmera tenir una superfície com la del taulell d'escacs o com la del taulell de cartró, no afecta a la precisió.
- La Kinect V2 presenta en tots els punts una tendència negativa de l'exactitud, fins arribar a 1 m de distància amb el blanc 1 (**Taules 27; Figura 81**). A partí d'aquí sembla que es manté bastant constant per la resta de distàncies. En canvi pel blanc 2, l'exactitud amb aquesta càmera té una clara tendència a augmentar negativament, a mesura que augmenta la distància (**Taula 28; Figura 83**). Amb la Kinect V2 l'exactitud es millor amb la superfícies del taulell d'escacs, que té diferències màximes d'entre -40 mm i -50 mm, mentre que amb el taulell de cartró l'exactitud cau fins a valors de prop de -70 mm.
- La Kinect V2 presenta en tots els punts, una pèrdua de precisió que va augmentant al llarg de totes les distàncies, amb el blanc 1 (**Taula 27; Figura 82**). En canvi amb el blanc 2 es té un comportament més irregular (**Taula 28; Figura 84**), però si que sembla que la majoria de punts tendeixen a perdre precisió amb la distància. Per als dos blancs no hi ha una gran diferència entre els valors màxims de desviació obtinguts, en els dos casos estan entre els 2,5 mm i els 3 mm, per tant sembla que la superfície de cap dels dos blancs afecta en gran manera a la precisió que s'obté.

- Amb les dos càmeres s'han obtingut millors resultats d'exactitud amb el taulell d'escacs, mentre que la precisió no s'ha vist afectada pel tipus de blanc. La Azure Kinect presenta major exactitud que la Kinect V2, però la precisió obtinguda de les dos té un ordre de magnitud bastant semblant.
- En la **Figura 85** es mostra una comparativa entre les dues càmeres i els dos blancs, pel que fa a la exactitud mitja. Aquesta exactitud s'ha obtingut de fer una mitja simple de les exactituds de tots els punts que estan a una mateixa distància, d'aquesta manera es pot tenir una idea de com evoluciona l'exactitud amb la distància independentment de la posició en la que es trobi un punt, i també poder comparar les càmeres entre elles. Fer això permet confirmar el que ja s'havia estat veient anteriorment, que l'exactitud de la Azure Kinect és millor que la Kinect V2, ja que els punts obtinguts amb la Azure estan més propers a zero. També permet veure que l'exactitud utilitzant el taulell d'escacs com a blanc sembla millor ja que no té una tendència cap a valors negatius tan pronunciada com al utilitzar el taulell de cartó, independentment de la càmera.
- S'han comparat els resultats de la mitja d'exactituds (**Figura 85**) amb els resultats d'un article previ^[8] que també utilitza la Kinect V2. En aquest article, s'ha mesurat la seva exactitud en funció de la distància d'un blanc (un taulell d'escac) respecte la Kinect V2, i s'han obtingut resultats no tant variables com en el present estudi. S'observen oscil·lacions de l'exactitud, sempre en valor negatiu, però l'exactitud es manté en un rang de valors comprés entre -18 i -21 mm almenys fins a distàncies d'uns 1,6 m. En el present estudi també s'han obtingut valors negatius d'exactitud per la Kinect V2, però la tendència de l'exactitud és a incrementar negativament amb la distància (especialment quan el blanc és el taulell de cartró). En aquest article es demostra que l'exactitud pot variar depenent del temps que porti funcionant la càmera, ja que la temperatura de la màquina pot augmentar i causar distorsió. Aquest podria ser un dels motius pel qual s'obtenen resultats tan diferents pel que fa a exactitud, i és que en nostre treball, les primeres captures i distàncies (0,5 m), es van dur a terme amb la màquina freda, però després de fer totes les repeticions i les distàncies finals (2,5 m), la màquina havia anat augmentant la temperatura durant el procés. Aquest fenomen no s'ha considerat en aquest estudi i seria necessari realitzar estudis futurs tenint-lo en compte per veure quin impacte té en els resultats obtinguts.

[8] Veure el següent article científic de la bibliografia: Wasenmüller, O; Stricker, D. (2017). Comparison of Kinect V1 and V2 Depth Images in Terms of Accuracy and Precision. *Springer International publishing*, 34-35.

- En la **Figura 86** es mostra una comparativa entre les dues càmeres i els dos blancs pel que fa a la precisió mitja. Aquesta precisió s'ha obtingut de fer la mitja simple de les precisions de tots els punts que estan a una mateixa distància, d'aquesta manera es possible veure l'evolució de la precisió amb la distància sense tenir en compte en quina posició es troba un punt o un altre, i fa més fàcil poder comparar les càmeres. Les gràfiques obtingudes confirmen el que ja s'havia vist anteriorment, que la precisió de la Azure Kinect i la Kinect V2 es troba en un rang de magnitud molt semblant, tot i que és millor la de la Azure Kinect; i que utilitzar el blanc 1 o el 2 no té un gran efecte en les mesures de precisió. En l'article utilitzat per comparar els resultats d'exactitud, també ha estat possible comparar els resultats de precisió mitja obtinguts amb la Kinect V2. Els rangs de valors que es mostren en l'article de l'evolució de la precisió amb la distància, estan d'acord amb els del present estudi, almenys fins a distàncies de uns 1,6 m que són els que mostra l'article. Per tant, el possible augment de temperatura que pot patir la càmera, al llarg del procés de fer les captures, no té un efecte significatiu en termes de precisió.
- També s'ha inclòs en la **Figura 86**, una corba teòrica de la Kinect V2, sobre l'evolució de la precisió amb l'increment de la distància, generada a partir d'una equació empírica publicada en un altre estudi previ^[9] realitzat amb aquesta càmera. A aquesta equació, s'han substituït els valors de les distàncies de 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m, 2,0 m i 2,5 m, per obtenir les seves corresponents precisions. A nivell qualitatiu, les corbes de precisió obtingudes en el nostre estudi, presenten una tendència creixent similar a la corba teòrica, tant pel que fa a la Kinect V2 com la Azure Kinect. Tot i això, els valors de precisió que s'obtenen amb la corba teòrica són pitjors que els obtinguts en el present estudi.

[9] Veure el següent article científic de la bibliografia: Gonzalez-Jorge, H; Rodríguez-Gonzálvez, P; Martínez-Sánchez, J; González-Aguilera, D; Arias, P; Gesto, M; Díaz-Vilariño, L. (2015). Metrological comparison between Kinect I and Kinect II sensors. *Measurement*, 70, 21-26.

8. AVALUACIÓ EXPERIMENTAL EN CONDICIONS EXTERIORS

8.1 Descripció de l'assaig realitzat

L'assaig en exterior s'ha realitzat als jardins del Campus Universitari de Cappont de la Universitat de Lleida. L'assaig és exactament igual que el que s'ha realitzat a l'interior, amb la única diferència que només s'ha fet amb la Azure Kinect amb el mode de profunditat NFOV Unbinned ja que és el que ha donat els millors resultats a l'interior. S'ha volgut centrar l'estudi en el comportament d'aquest mode en l'exterior ja que permet prendre captures a més distàncies que el mode WFOV, o que la Kinect V2 que ja ha estat avaluada en assajos d'exterior en altres estudis previs^[10].

A part d'això, cal aclarir que aquest assaig en exterior es merament qualitatiu. Els resultats obtinguts no es poden donar total validesa degut al terreny irregular en que s'ha fet l'assaig. Es va buscar el terreny més pla possible, però al tenir un terra pedregós, les taules sobre les que es col·locaven el taulell d'escacs i la càmera tenien una certa inclinació que s'ha de tenir en compte en les lectures de les coordenades de cada punt. Per a que fos més fàcil fer l'assaig a l'exterior, en comptes d'utilitzar unes quantes taules disposades en filera per cobrir la distància dels assajos, únicament es van fer servir dos taules: una per recolzar la càmera i l'ordinador, i una altra per col·locar el taulell d'escacs i moure-la fins a la distància en que es volgués fer la captura, tal com es mostra en la **Figura 87**.



Figura 87 Muntatge realitzat per l'assaig en condicions exteriors.

[10] Veure estudi de la Kinect V2 en l'apartat "2.2 Estudis previs".

Per entendre per què s'ha decidit no donar validesa als resultats obtinguts es necessari veure l'esquema que es mostra en la **Figura 88**. Si tant la taula en la que es troba la càmera com la taula en la que es troba el taulell d'escacs estiguessin paral·lels al terra (**Figura 88, superior**) no hi hauria cap problema ja que les coordenades que es llegirien serien les reals, però al tenir un terreny tan irregular en les condicions exteriors, fa que cada taula tingui una inclinació i per tant, les lectures de les coordenades que s'obtenen no són les correctes (**Figura 88, inferior**). Cal aclarir que aquest efecte es manifesta principalment en la coordenada y , en la z no hi ha una gran diferència i la inclinació de les taules sobre el terreny irregular es pot considerar com una rotació sobre el eix x de la càmera, per tant la coordenada x tampoc presenta gran error. Tot i això s'ha decidit descartar els resultats obtinguts (que es poden consultar en l'Annex d'aquest estudi) i fer un anàlisi únicament qualitatiu, ja que les condicions en que s'han fet l'estudi no han permès poder fer més assajos en l'exterior.

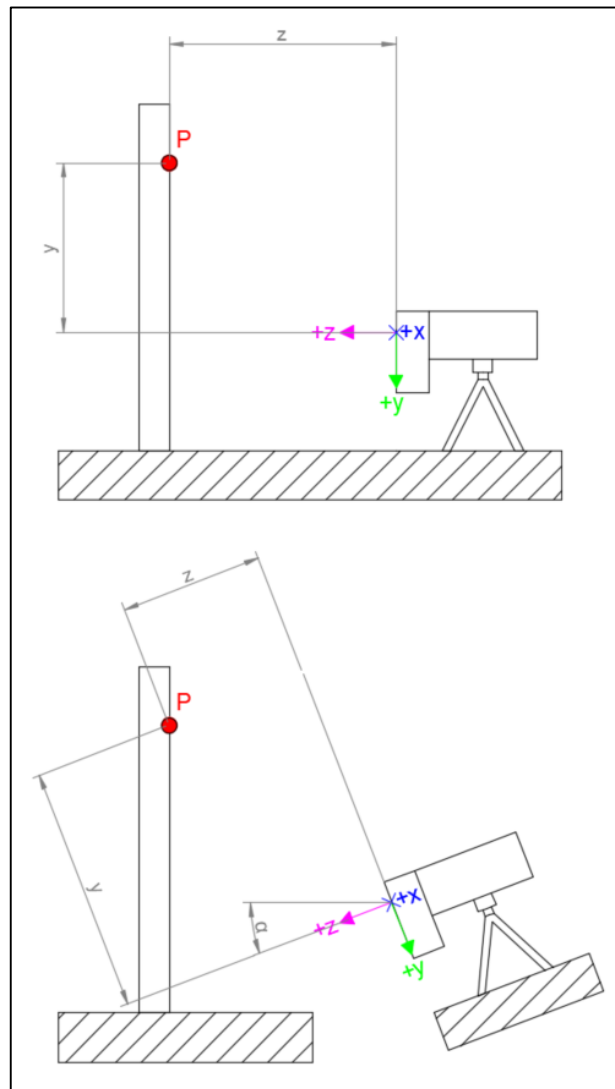


Figura 88 Esquematització de l'error produït al prendre les mesures en condicions d'exterior.

La inclinació de les taules s'ha pogut mesurar a través d'un mesurador de bombolla, així com també amb un mesurador d'inclinacions digital per tal de veure els graus d'inclinació (**Figura 89**). Així doncs, s'han fet captures del taulell a distàncies de 0,5 m, 1,0 m, 2,0 m, 3,0 m, 4,0 m i 5,0 m. Tot seguint el procediment de l'assaig d'interior, s'han extret els valors de les coordenades que s'han recollit en una taula que es pot veure en els annexes d'aquets estudi.

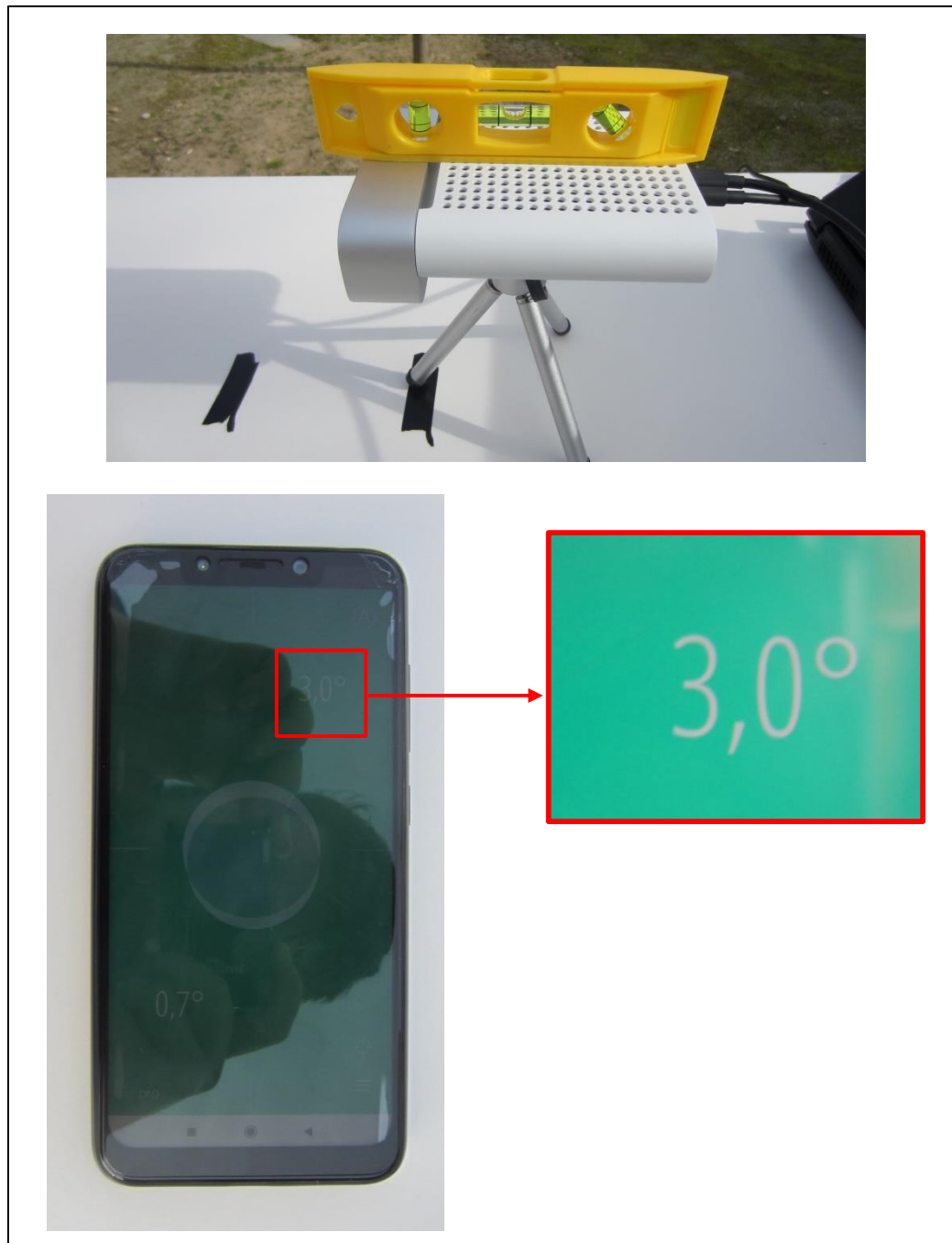


Figura 89 A dalt es té la Azure Kinect amb el nivell de bombolla. A baix es veu una prova del mesurador d'inclinacions que mostra una inclinació d'una de les taules de 3,0°.

8.2 Resultats i discussió

8.2.1 Taula resum de les captures

Igual que en l'assaig d'interior, en aquest apartat es mostren les imatges que s'han pogut extreure de les captures en les diferents distàncies (**Taula 46**). Al tractar-se de la Azure Kinect, per cada captura és possible extreure la imatge de color, la imatge de profunditat (escala de grisos i escala de colors), imatge IR i el núvol de punts generat.

Abans però, es presenta la **Taula 29** que recull l'hora, la data i les lectures del luxímetre corresponents a l'assaig realitzat, tant a l'inici com al final, ja que degut a la complexitat al realitzar aquest assaig a l'exterior, es tarda un temps en completar-lo i les condicions de llum van canviant.

Taula 29 Informació de l'assaig realitzat a exterior amb la Azure Kinect i el mode NFOV Unbinned.


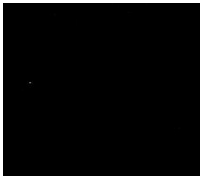

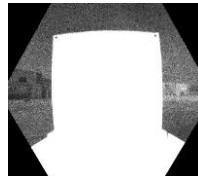











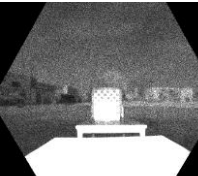
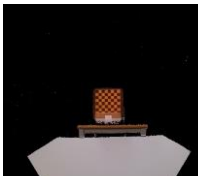




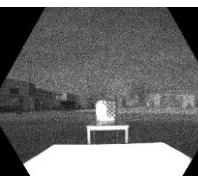


Azure Kinect (NFOV Unbinned)				
Hora	Data	nº repetició	LUX	Mitja
15:52 (Inici)	28/02/2020	1	1531	1454,00
		2	1733	
		3	1098	
17:34 (Final)	28/02/2020	1	2203	2158,00
		2	2238	
		3	2033	

A més, en la **Figura 90** es mostren diferents imatges de les condicions meteorològiques de la situació en que es va realitzar l'assaig d'exterior. Durant tot l'assaig es va tenir un cel parcialment nuvolat que reduïa la radiació directa del sol. A més, es va fer el muntatge de forma que el sol quedés per darrera de l'objectiu la càmera per tal d'evitar captures a contra llum.


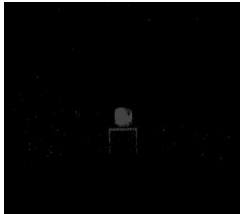

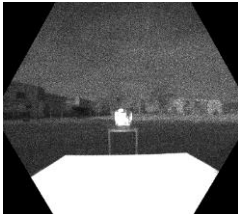
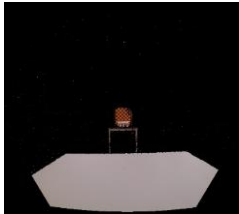




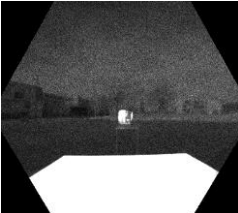
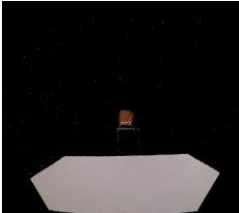
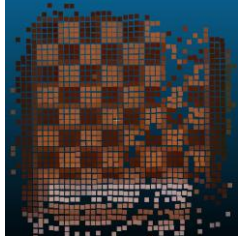


Figura 90 Imatges de les condicions ambientals i meteorològiques en que es va realitzar l'assaig.

Taula 30 (Part I) Imatges extretes de les captures de la Azure Kinect en mode NFOV Unbinned a distàncies de 0,5 m, 1,0 m, 2,0 m, 3,0 , 4,0 m i 5,0 m de la càmera.

Distància	Imatge de color	Imatge de profunditat (escala grisos)	Imatge de profunditat (escala colors)	Imatge IR	Imatge transformada (color + profunditat)	Núvol de punts
0,5 m						
1,0 m						
2,0 m						
3,0 m						

Taula 30 (Part II) Imatges extretes de les captures de la Azure Kinect en mode NFOV Unbinned a distàncies de 0,5 m, 1,0 m, 2,0 m, 3,0 , 4,0 m i 5,0 m de la càmera.

Distància	Imatge de color	Imatge de profunditat (escala grisos)	Imatge de profunditat (escala colors)	Imatge IR	Imatge transformada (color + profunditat)	Núvol de punts
4,0 m						
5,0 m						

8.2.2 Discussió dels resultats

Abans d'analitzar les captures obtingudes, es important comentar els errors que s'han pogut cometre durant la realització del assaig:

- S'han pogut cometre els mateixos errors comentats en l'assaig d'interior^[11].
- L'assaig d'exterior, igual que el d'interior, s'ha fet amb el mateix blanc (el taulell d'escacs). Per tant, el problema de *mixed pixels* vist prèviament que comporta utilitzar aquest blanc, torna a estar present en aquest assaig. De nou, no es creu que tingui influència en la zona central de la quadricula del taulell d'escacs, però s'ha de tenir present ja que en condicions d'exterior, sense un fons uniforme darrere del blanc, pot accentuar aquest problema.
- Errors per la inclinació del terreny on es van realitzar les proves a l'exterior. Per fer l'assaig es van necessitar dos taules, una on estava la càmera i l'altra on es tenia el taulell d'escacs (sent aquesta la que es movia per anar recorrent les diferents distàncies). Degut a les irregularitats del terreny, les taules tenen inclinacions diferents, cosa que afecta principalment a les mesures en les coordenades y, i lleugerament a les coordenades x i z, de la Azure Kinect.

A continuació es presenten les diferents idees que es poden extreure observant les imatges recollides a l'exterior (**Taula 30**) per al mode NFOV Unbinned de la Azure Kinect, així com també una comparativa amb les captures obtingudes a l'assaig d'interior amb aquesta mateixa càmera i el mateix mode (**Taula 14**):

- Fins als 2 m de distància es poden apreciar visualment núvols de punts molt semblants als que s'obtenien en l'assaig d'interior. Tota la quadrícula interna del taulell d'escacs és visible (excepte la zona concreta en la que hi ha una saturació de intensitat per estar just davant del emissor IR, tal i com ja succeïa en l'assaig d'interior). Les imatges de profunditat (escala de grisos, escala de colors), la imatge IR i la transformada presenten la diferència de que en l'assaig d'interior es marcava la paret de fons, fet que modificava la graduació de colors de tota la imatge. En l'assaig en camp obert, no es detecta cap fons i només es visible el taulell d'escacs que està en primer pla davant de la càmera.

[11] Veure apartat "7.2.2 Resultats de cada càmera".

- Dels 3 m fins als 5 m és possible veure una clara pèrdua de punts del núvol, especialment en la part superior dreta del taulell d'escacs, que en el cas de l'assaig d'interior no és tan accentuat. Pel que fa a la resta d'imatges corresponent a aquestes distàncies, a part del tema del fons no visible que s'ha parlat a l'anterior punt, no hi ha molta més diferència amb les captures de interior.
- Com era d'esperar, els resultats de les captures obtingudes en exterior han sigut pitjors que en interior, ja no només per no tenir una situació de llum controlada en l'exterior, sinó també per la problemàtica que suposa realitzar el muntatge de l'assaig a l'exterior.
- Tot i els punts mencionats anteriorment, l'assaig en exterior ha donat un resultat bastant acceptable (almenys a nivell qualitatiu) i presenta indicis de que podrà ser utilitzada aquesta càmera amb aquesta configuració en futurs projectes en condicions d'exterior. Encara així, degut a la situació en que s'ha realitzat l'estudi on només ha estat possible fer un únic assaig a l'exterior, apareix la necessitat de realitzar estudis futurs amb diferents condicions de llum, en terrenys més irregulars en condicions més canviants per tal de tenir major enteniment de quina és el millor escenari per realitzar captures a l'exterior.

9. CONCLUSIONS I TREBALL FUTUR

Les conclusions que s'extreuen d'aquest estudi són les següents:

- La Azure Kinect de Microsoft és una càmera RGB-D nova en el mercat i que té el potencial per ser una de les càmeres que més ajudin en el desenvolupament d'aplicacions de captació de informació tridimensional, tal i com ja ho va ser la seva predecessora, la Kinect V2 també de Microsoft.
- Tenint únicament en compte la generació de núvols de punts a partir de captures i no de gravacions (que és el que s'ha fet en aquest estudi), la millor configuració per la captació de informació de profunditat és el NFOV Unbinned tal i com s'ha demostrat en l'assaig d'interior realitzat.
- A trets generals, la Azure Kinect ha donat millors resultats que la Kinect V2 en l'assaig d'interior (tant l'estudi de distàncies, com en precisió i exactitud). Era d'esperar, ja que la Azure Kinect ha nascut de la demanda d'una Kinect V2 més professionalitzada, i ha donat com a resultat una càmera amb una tecnologia més acurada i amb components de major qualitat, que l'han permès superar al seu model anterior.
- L'assaig en exterior només permet extreure una visió qualitativa de les captures de la Azure Kinect en condicions de llum no controlades. Encara així, degut a la situació en que s'ha fet l'estudi només s'ha pogut fer un assaig que no és suficient per determinar el comportament de la càmera a l'exterior. Únicament es possible extreure que la Azure Kinect presenta indicis de que podrà ser utilitzada en exterior tot i que amb pitjors resultats que en condicions d'interior.

La Azure Kinect al ser nova en el mercat, fa que hi hagi molt poca documentació i articles existents sobre aquesta càmera, cosa que obre un gran ventall de treballs futurs que es poden realitzar en base a aquest estudi, dintre els quals destaquen els següents:

- Anàlisis dels altres modes de profunditat de la Azure Kinect que s'han descartat en aquest estudi, tant en condicions d'interior com d'exterior.
- Estudis de com afecta el material, forma, dimensions o geometria del blanc en les captures amb la Azure Kinect.
- Desenvolupament del software de generació de núvol de punts a partir de captures, per a generar núvols de punts a partir de gravacions (incorporant la informació de la IMU per corregir les coordenades durant el moviment de la càmera en la gravació).
- Estudi de rangs, exactitud i precisió de la càmera i dels diferents modes en condicions d'exterior.



BIBLIOGRAFIA

Articles científics:

- Al-Naji, A; Gibson, K; Lee, S; CHahl, J. (2017). Real Time Apnoea Monitoring of Children Using the Microsoft Kinect Sensor: A Pilot Study. *Sensors*, 17, 286.
- Bueno, M; Díaz-Vilariño, L; Martínez-Sánchez, J; González-Jorge, H; Lorenzo, H. (2015). Metrological evaluation of KinectFusion and its comparison with Microsoft Kinect sensor. *Measurement*, 73, 137-145.
- Corti, A; Giancola, S; Mainetti, G; Sala, R. (2016). A metrological characterization of the Kinect V2 time-of-flight camera. *Robotic and Autonomous Systems*, 75, 584-594.
- DiFilippo, N; Jouaneh, M. (2015). Characterization of Different Microsoft Kinect Sensor Models. *Sensors Journal*, 15, 8.
- Gonzalez-Jorge, H; Rodríguez-Gonzálvez, P; Martínez-Sánchez, J; González-Aguilera, D; Arias, P; Gesto, M; Díaz-Vilariño, L. (2015). Metrological comparison between Kinect I and Kinect II sensors. *Measurement*, 70, 21-26.
- Khoshelham, K; Oude Elberink, S. (2012). Accuracy and Resolution of Kinect Depth Data for Indoor Mapping Applications. *Sensors*, 12, 1437-1454.
- Lachat, E; Macher, H; Landes, T; Grussenmeyer, P. (2015). Assessment and Calibration of a RGB-D Camera (Kinect V2 Sensor) Towards a Potential Use for Close-Range 3D Modelling. *Remote sensing*, 7, 13070-13097.
- Leo, M; Natale, A; Del-Coco, M; Carcagnì, P; Distantè, C. (2017). Robust Estimation of Object Dimensions and External Defect Detection with a Low-Cost Sensor. *Springer Science*, 36, 17.
- Sarbolandi, H; Lefloch, D; Kolb, A. (2015). Kinect range sensing: Structures-light versus Time-of-Flight Kinect. *Computer Vision and Image Understanding*, 139, 1-20.
- Wasenmüller, O; Stricker, D. (2017). Comparison of Kinect V1 and V2 Depth Images in Terms of Accuracy and Precision. *Springer International publishing*, 34-35.

Pàgines web:

CloudCompare. 3D Point cloud and mesh processing software (Open Source Project) (accedit febrer 2020): <https://www.danielgm.net/cc/>

Factsheet-Azure-Kinect-DK.pdf (accedit desembre 2019): <https://3er1viui9wo30pkxh1v2nh4w-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/prod/2019/06/Factsheet-Azure-Kinect-DK.pdf>

Github. Azure-Kinect-Sensor-SDK (accedit febrer 2020): <https://github.com/microsoft/Azure-Kinect-Sensor-SDK/tree/3f6bdc7054a0cac86c9ef426f232590b0e88c520>

IDS. Cámaras industriales de IDS (accedit desembre 2019): <https://es.ids-imaging.com/gige-cameras.html>

IDS. Ensenso XR (accedit desembre 2019): <https://es.ids-imaging.com/ensenso-3d-camera-xr-series.html>

Intel. RealSense depth camera D435 (accedit maig 2020): <https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d435/>

Microsoft. Azure Kinect DK coordinate Systems (accedit gener 2020): <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/kinect-dk/coordinate-systems>

Microsoft. Azure Kinect DK documentation (accedit gener 2020): <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/kinect-dk/>

Microsoft. Azure Kinect DK hardware specifications (accedit desembre 2019): <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/kinect-dk/hardware-specification>

Microsoft. Azure Kinect Sensor SDK (accedit gener 2020): https://microsoft.github.io/Azure-Kinect-Sensor-SDK/master/structk4a_record_configuration_t.html

Microsoft. Quickstart: Install and use a Package in Visual Studio (Windows Only) (accedit febrer 2020): <https://docs.microsoft.com/en-us/nuget/quickstart/install-and-use-a-package-in-visual-studio>

OpenCV. ColorMaps in OpenCV (accedit febrer 2020): <https://docs.opencv.org/2.4/modules/contrib/doc/facerec/colormaps.html>

OpenCV. OpenCV (Open Source Computer Vision) (accedit febrer 2020): https://docs.opencv.org/master/d1/d1b/group_core_hal_interface.html#ga9d2ee1a8334733dea7482a47a88e0f87

OpenCV. OpenCV_tutorials.pdf (accedit febrer 2020): https://docs.opencv.org/2.4/opencv_tutorials.pdf

OpenCV. Reading and Writing Images and Video (accedit febrer 2020): [https://docs.opencv.org/2.4/modules/highgui/doc/reading_and_writing_images_and_video.html?highlight=get#bool%20imwrite\(const%20string&%20filename,%20InputArray%20img,%20const%20vector%3Cint%3E&%20params\)](https://docs.opencv.org/2.4/modules/highgui/doc/reading_and_writing_images_and_video.html?highlight=get#bool%20imwrite(const%20string&%20filename,%20InputArray%20img,%20const%20vector%3Cint%3E&%20params))

PLY. Example of an ASCII PLY file (accedit febrer 2020): <http://paulbourke.net/dataformats/ply/>

ResearchGate (Forum). How to determine the number of replication for an experiment (accedit maig 2020):

[https://www.researchgate.net/post/How to determine the number of replication for an experiment](https://www.researchgate.net/post/How_to_determine_the_number_of_replication_for_an_experiment)

Roland Smeenk. Kinect V1 and Kinect V2 fields of view compared (accedit març 2020):

<https://smeenk.com/kinect-field-of-view-comparison/>

SoftSchools. Inverse Square Law Formula (accedit març 2020):

https://www.softschools.com/formulas/physics/inverse_square_law_formula/82/

Stack Overflow. OpenCV read jpeg image from buffer (accedit febrer 2020):

<https://stackoverflow.com/questions/14727267/opencv-read-jpeg-image-from-buffer/15092777>

WikiHow. How to calculate precision (accedit maig 2020): <https://www.wikihow.com/Calculate-Precision>

Wikipedia. Cámara de tiempo de vuelo (accedit gener 2020):

https://es.wikipedia.org/wiki/C%C3%A1mara_de_tiempo_de_vuelo

Suport audiovisual:

Youtube. Channel: *Decipher Technic*.. Install OpenCV-C++ with Visual Studio 2017 on Windows PC (accedit febrer 2020): <https://www.youtube.com/watch?v=M-VHaLHC4XI>

Youtube. Channel: *IDS Imaging Development Systems GmbH* (accedit desembre 2019): <https://www.youtube.com/user/IDSGmbH>

Youtube. Latorre, J. Funcionamiento del sensor CMOS (Canon) (accedit desembre 2019): <https://www.youtube.com/watch?v=858bFzo2Bxw>

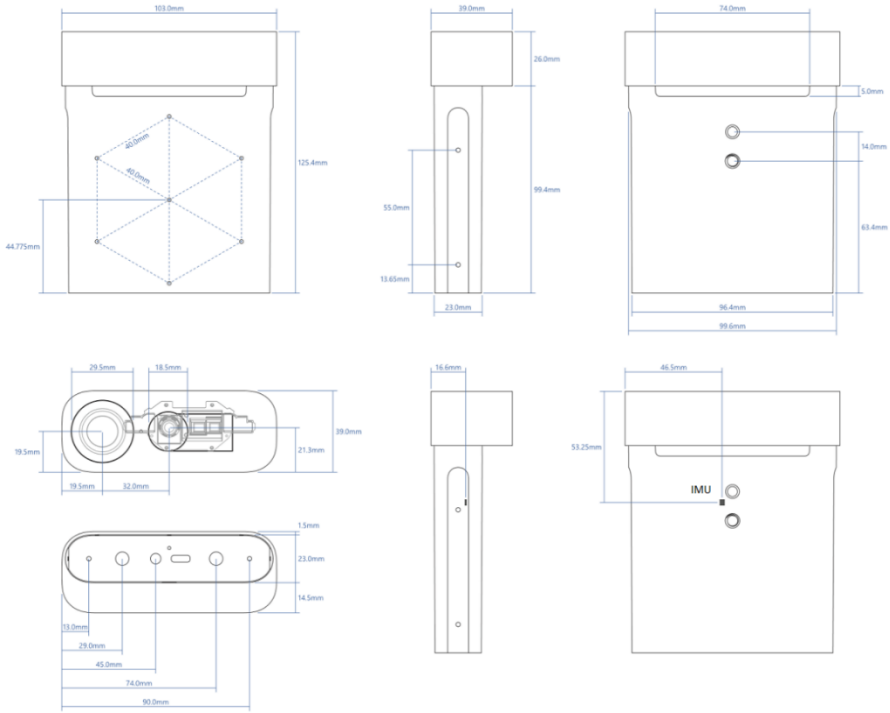
Youtube. Microsoft. Intro to Developing for Azure Kinect-BRK1001(accedit al gener de 2020): <https://www.youtube.com/watch?v=HzeYb00eQRI>

Youtube. Riquelme A. Videotutorial básico CloudCompare (accedit febrer 2020): <https://www.youtube.com/watch?v=7M66Xn3Q5Og>

ANNEXOS

ANNEX 1. Fitxa tècnica de la Azure Kinect

Exterior	Dimensions: 4.96 x 4.05 x 1.53 in (126.00 x 103.00 x 39.00 mm) Weight: 15.5 oz (440g)
Sensors	Depth camera: 1MP Time-of-flight RGB camera: 12MP CMOS sensor rolling shutter IMU: 3D digital accelerometer and a 3D digital gyroscope Microphone: 7-microphone circular array
Input/Output/Connectivity	USB-C data connector Power through USB-C (USB-C to USB-C cable not included) or external PSU Sync connectors to synchronize multiple units
In the box	Azure Kinect DK device* Stand USB-A to USB-C data cable USB-A to DC barrel-jack power cable Power supply Wrench *Azure Kinect DK is a PC peripheral
Warranty	One-year standard warranty



The technical drawings provide detailed dimensions for the Azure Kinect DK device and its stand. The top view shows a square base with a 103.0mm width and 126.0mm height. The side view shows a 39.0mm wide top section and a 99.4mm high stand. The front view shows a 74.0mm wide top section and a 63.4mm high stand. The rear view shows a 96.4mm wide base and a 99.4mm high stand. The IMU (Inertial Measurement Unit) is located on the rear of the device, with a 16.6mm wide section and a 53.25mm high section. The device itself has a 29.5mm wide top section and a 39.0mm high stand. The front view also shows a 19.5mm wide section and a 21.3mm high stand. The side view shows a 13.65mm wide section and a 23.0mm high stand. The rear view shows a 1.5mm wide section and a 23.0mm high stand. The bottom view shows a 90.0mm wide base and a 74.0mm high stand. The top view also shows a 44.775mm wide section and a 45.0mm high stand. The side view shows a 55.0mm wide section and a 11.65mm high stand. The front view shows a 29.5mm wide section and a 18.5mm high stand. The rear view shows a 19.5mm wide section and a 32.0mm high stand. The bottom view shows a 13.0mm wide section and a 29.0mm high stand. The top view also shows a 45.0mm wide section and a 74.0mm high stand. The side view shows a 16.6mm wide section and a 53.25mm high section. The front view shows a 1.5mm wide section and a 23.0mm high section. The rear view shows a 1.5mm wide section and a 14.0mm high section. The bottom view shows a 13.0mm wide section and a 29.0mm high section. The top view also shows a 45.0mm wide section and a 74.0mm high section. The side view shows a 16.6mm wide section and a 53.25mm high section. The front view shows a 1.5mm wide section and a 23.0mm high section. The rear view shows a 1.5mm wide section and a 14.0mm high section. The bottom view shows a 13.0mm wide section and a 29.0mm high section.

Figura A1 Característiques tècniques (adapt) i mesures (abaix) de la Azure Kinect (Font: Microsoft).

ANNEX 2. Rangs de la càmera de profunditat (taules expandides)

Taula A1 Rangs de la càmera de profunditat de la Azure Kinect (NFOV Unbinned) per al blanc 1.

Distància al blanc 1		Azure Kinect (NFOV Unbinned)																		
		A			B			C			D			E			L1	L2	L3	L4
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z				
0,25 m	Mostra (mm)	1	-60	268	-95	-119	265	95	39	268	-78	15	267	118	-135	266	N/A	N/A	37	38
	Real (mm)	0	-50	250	-95	-107	250	95	43	250	-75	23	250	113	-125	250	380	380	38	38
	Error (mm)	1	10	18	0	12	15	0	4	18	3	8	17	5	10	16	N/A	N/A	1	0
0,5 m	Mostra (mm)	1	-67	511	-96	-125	510	94	32	514	-78	10	512	115	-141	510	372	379	39	38
	Real (mm)	0	-50	500	-95	-107	500	95	43	500	-75	23	500	113	-125	500	380	380	38	38
	Error (mm)	1	17	11	1	18	10	1	11	14	3	13	12	2	16	10	8	1	1	0
1,00 m	Mostra (mm)	-2	-74	1020	-95	-133	1020	93	23	1021	-79	1	1020	115	-149	1023	369	380	33	38
	Real (mm)	0	-50	1000	-95	-107	1000	95	43	1000	-75	23	1000	113	-125	1000	380	380	38	38
	Error (mm)	2	24	20	0	26	20	2	20	21	4	22	20	2	24	23	11	0	5	0
2,21 m	Mostra (mm)	-5	-97	2214	-97	-159	2205	92	1	2230	-80	-21	2216	114	-174	2212	350	381	31	31
	Real (mm)	0	-50	2210	-95	-107	2210	95	43	2210	-75	23	2210	113	-125	2210	380	380	38	38
	Error (mm)	5	47	4	2	52	5	3	42	20	5	44	6	1	49	2	30	1	7	7
2,88 m	Mostra (mm)	-1	-109	2902	-99	-169	2901	91	-10	2907	-81	-40	2896	115	-186	2906	N/A	367	36	40
	Real (mm)	0	-50	2880	-95	-107	2880	95	43	2880	-75	23	2880	113	-125	2880	380	380	38	38
	Error (mm)	1	59	22	4	62	21	4	53	27	6	63	16	2	61	26	N/A	13	2	2
3,86 m	Mostra (mm)	-1	-131	3866	-101	-192	3853	91	-37	3874	-85	-60	3866	114	-209	3860	N/A	360	46	38
	Real (mm)	0	-50	3860	-95	-107	3860	95	43	3860	-75	23	3860	113	-125	3860	380	380	38	38
	Error (mm)	1	81	6	6	85	7	4	80	14	10	83	6	1	84	0	N/A	20	8	0
5,36 m	Mostra (mm)	-23	-169	5321	-118	-222	5318	72	-62	5334	-107	-93	5330	93	-233	5316	368	370	32	32
	Real (mm)	0	-50	5360	-95	-107	5360	95	43	5360	-75	23	5360	113	-125	5360	380	380	38	38
	Error (mm)	23	119	39	23	115	42	23	105	26	32	116	30	20	108	44	12	10	6	6

Taula A2 Rangs de la càmera de profunditat de la Azure Kinect (NFOV Unbinned) per al blanc 2.

Distància al blanc 2		Azure Kinect (NFOV Unbinned)				
		L5	L6	L7	L8	D1
0,25 m	Mostra (mm)	249	N/A	43	174	124
	Real (mm)	240	120	40	170	120
	Error (mm)	9	N/A	3	4	4
0,5 m	Mostra (mm)	248	123	44	171	121
	Real (mm)	240	120	40	170	120
	Error (mm)	8	3	4	1	1
1,00 m	Mostra (mm)	246	122	41	174	127
	Real (mm)	240	120	40	170	120
	Error (mm)	6	2	1	4	7
2,21 m	Mostra (mm)	242	120	35	177	123
	Real (mm)	240	120	40	170	120
	Error (mm)	2	0	5	7	3
2,88 m	Mostra (mm)	241	126	40	163	121
	Real (mm)	240	120	40	170	120
	Error (mm)	1	6	0	7	1
3,86 m	Mostra (mm)	245	115	46	N/A	115
	Real (mm)	240	120	40	170	120
	Error (mm)	5	5	6	N/A	5
5,36 m	Mostra (mm)	243	127	32	N/A	127
	Real (mm)	240	120	40	170	120
	Error (mm)	3	7	8	N/A	7

Taula A3 Rangs de la càmera de profunditat de la Azure Kinect (NFOV Unbinned) per al blanc 3.

Distància al blanc 3		Azure Kinect (NFOV Unbinned)	
		L9	L10
0,25 m	Mostra (mm)	N/A	N/A
	Real (mm)	311	60
	Error (mm)	N/A	N/A
0,5 m	Mostra (mm)	311	51
	Real (mm)	311	60
	Error (mm)	0	9
1 m	Mostra (mm)	311	61
	Real (mm)	311	60
	Error (mm)	0	1
2,21 m	Mostra (mm)	308	60
	Real (mm)	311	60
	Error (mm)	3	0
2,88 m	Mostra (mm)	N/A	N/A
	Real (mm)	311	60
	Error (mm)	N/A	N/A
3,86 m	Mostra (mm)	N/A	N/A
	Real (mm)	311	60
	Error (mm)	N/A	N/A
5,36 m	Mostra (mm)	N/A	N/A
	Real (mm)	311	60
	Error (mm)	N/A	N/A

Taula A4 Rangos de la càmera de profunditat de la Azure Kinect (NFOV 2x2 Binned) per al blanc 1.

Distància al blanc 1		Azure Kinect (NFOV 2x2 Binned)																		
		A			B			C			D			E			L1	L2	L3	L4
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z				
0,25 m	Mostra (mm)	2	-57	276	-90	-115	280	95	40	269	-74	19	279	118	-131	270	N/A	N/A	37	37
	Real (mm)	0	-50	250	-95	-107	250	95	43	250	-75	23	250	113	-125	250	380	380	38	38
	Error (mm)	2	7	26	5	8	30	0	3	19	1	4	29	5	6	20	N/A	N/A	1	1
0,5 m	Mostra (mm)	0	-60	514	-93	-121	513	96	37	519	-76	17	520	117	-135	509	375	381	37	37
	Real (mm)	0	-50	500	-95	-107	500	95	43	500	-75	23	500	113	-125	500	380	380	38	38
	Error (mm)	0	10	14	2	14	13	1	6	19	1	6	20	4	10	9	5	1	1	1
1,00 m	Mostra (mm)	9	-60	1026	-86	-120	1028	98	38	1025	-73	14	1030	124	-137	1022	370	379	39	38
	Real (mm)	0	-50	1000	-95	-107	1000	95	43	1000	-75	23	1000	113	-125	1000	380	380	38	38
	Error (mm)	9	10	26	9	13	28	3	5	25	2	9	30	11	12	22	10	1	1	0
2,21 m	Mostra (mm)	10	-68	2223	-87	-123	2220	107	30	2227	-69	12	2226	134	-140	2217	N/A	372	28	26
	Real (mm)	0	-50	2210	-95	-107	2210	95	43	2210	-75	23	2210	113	-125	2210	380	380	38	38
	Error (mm)	10	18	13	8	16	10	12	13	17	6	11	16	21	15	7	N/A	8	10	12
2,88 m	Mostra (mm)	13	-66	2906	-79	-125	2908	105	28	2903	-67	4	2907	129	-148	2900	N/A	368	24	24
	Real (mm)	0	-50	2880	-95	-107	2880	95	43	2880	-75	23	2880	113	-125	2880	380	380	38	38
	Error (mm)	13	16	26	16	18	28	10	15	23	8	19	27	16	23	20	N/A	12	14	14
3,86 m	Mostra (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Real (mm)	0	-50	3860	-95	-107	3860	95	43	3860	-75	23	3860	113	-125	3860	380	380	38	38
	Error (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
5,36 m	Mostra (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	361	360	N/A	N/A
	Real (mm)	0	-50	5360	-95	-107	5360	95	43	5360	-75	23	5360	113	-125	5360	380	380	38	38
	Error (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	19	20	N/A	N/A



Taula A5 Rangs de la càmera de profunditat de la Azure Kinect (NFOV 2x2 Binned) per al blanc 2.

Distància al blanc 2		Azure Kinect (NFOV 2x2 Binned)				
		L5	L6	L7	L8	D1
0,25 m	Mostra (mm)	N/A	N/A	42	173	122
	Real (mm)	240	120	40	170	120
	Error (mm)	N/A	N/A	2	3	2
0,5 m	Mostra (mm)	243	119	41	170	121
	Real (mm)	240	120	40	170	120
	Error (mm)	3	1	1	0	1
1,00 m	Mostra (mm)	247	127	41	170	121
	Real (mm)	240	120	40	170	120
	Error (mm)	7	7	1	0	1
2,21 m	Mostra (mm)	248	N/A	36	N/A	115
	Real (mm)	240	120	40	170	120
	Error (mm)	8	N/A	4	N/A	5
2,88 m	Mostra (mm)	242	N/A	35	N/A	103
	Real (mm)	240	120	40	170	120
	Error (mm)	2	N/A	5	N/A	17
3,86 m	Mostra (mm)	N/A	N/A	31	N/A	N/A
	Real (mm)	240	120	40	170	120
	Error (mm)	N/A	N/A		N/A	N/A
5,36 m	Mostra (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Real (mm)	240	120	40	170	120
	Error (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Taula A6 Rangs de la càmera de profunditat de la Azure Kinect (NFOV 2x2 Binned) per al blanc 3.

Distància al blanc 3		Azure Kinect (NFOV 2x2 Binned)	
		L9	L10
0,25 m	Mostra (mm)	N/A	N/A
	Real (mm)	311	60
	Error (mm)	N/A	N/A
0,5 m	Mostra (mm)	317	49
	Real (mm)	311	60
	Error (mm)	6	11
1,00 m	Mostra (mm)	309	53
	Real (mm)	311	60
	Error (mm)	2	7
2,21 m	Mostra (mm)	314	N/A
	Real (mm)	311	60
	Error (mm)	3	N/A
2,88 m	Mostra (mm)	N/A	N/A
	Real (mm)	311	60
	Error (mm)	N/A	N/A
3,86 m	Mostra (mm)	N/A	N/A
	Real (mm)	311	60
	Error (mm)	N/A	N/A
5,36 m	Mostra (mm)	N/A	N/A
	Real (mm)	311	60
	Error (mm)	N/A	N/A



Taula A7 Rangs de la càmera de profunditat de la Azure Kinect (WFOV Unbinned) per al blanc 1.

Distància al blanc 1		Azure Kinect (WFOV Unbinned)																		
		A			B			C			D			E			L1	L2	L3	L4
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z				
0,25 m	Mostra (mm)	-1	-51	285	-94	-112	288	96	48	278	-79	26	288	119	-127	274	N/A	371	36	41
	Real (mm)	0	-50	250	-95	-107	250	95	43	250	-75	23	250	113	-125	250	380	380	38	38
	Error (mm)	1	1	35	1	5	38	1	5	28	4	3	38	6	2	24	N/A	9	2	3
0,5 m	Mostra (mm)	-1	-47	521	-95	-110	521	97	51	521	-79	29	523	118	-125	516	378	372	38	38
	Real (mm)	0	-50	500	-95	-107	500	95	43	500	-75	23	500	113	-125	500	380	380	38	38
	Error (mm)	1	3	21	0	3	21	2	8	21	4	6	23	5	0	16	2	8	0	0
1,00 m	Mostra (mm)	6	-39	1029	-87	-96	1031	101	56	1022	-71	36	1028	123	-114	1025	361	365	34	37
	Real (mm)	0	-50	1000	-95	-107	1000	95	43	1000	-75	23	1000	113	-125	1000	380	380	38	38
	Error (mm)	6	11	29	8	11	31	6	13	22	4	13	28	10	11	25	19	15	4	1
2,21 m	Mostra (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Real (mm)	0	-50	2210	-95	-107	2210	95	43	2210	-75	23	2210	113	-125	2210	380	380	38	38
	Error (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
2,88 m	Mostra (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Real (mm)	0	-50	2880	-95	-107	2880	95	43	2880	-75	23	2880	113	-125	2880	380	380	38	38
	Error (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
3,86 m	Mostra (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Real (mm)	0	-50	3860	-95	-107	3860	95	43	3860	-75	23	3860	113	-125	3860	380	380	38	38
	Error (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
5,36 m	Mostra (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Real (mm)	0	-50	5360	-95	-107	5360	95	43	5360	-75	23	5360	113	-125	5360	380	380	38	38
	Error (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Taula A8 Rangs de la càmera de profunditat de la Azure Kinect (WFOV Unbinned Binned) per al blanc 2.

Distància al blanc 2		Azure Kinect (WFOV Unbinned)				
		L5	L6	L7	L8	D1
0,25 m	Mostra (mm)	254	124	43	178	122
	Real (mm)	240	120	40	170	120
	Error (mm)	14	4	3	8	2
0,5 m	Mostra (mm)	249	122	41	178	122
	Real (mm)	240	120	40	170	120
	Error (mm)	9	2	1	8	2
1,00 m	Mostra (mm)	248	122	41	173	121
	Real (mm)	240	120	40	170	120
	Error (mm)	8	2	1	3	1
2,21 m	Mostra (mm)	249	N/A	37	N/A	120
	Real (mm)	240	120	40	170	120
	Error (mm)	9	N/A	3	N/A	0
2,88 m	Mostra (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Real (mm)	240	120	40	170	120
	Error (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
3,86 m	Mostra (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Real (mm)	240	120	40	170	120
	Error (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
5,36 m	Mostra (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Real (mm)	240	120	40	170	120
	Error (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Taula A9 Rangs de la càmera de profunditat de la Azure Kinect (WFOV Unbinned Binned) per al blanc 3.

Distància al blanc 3		Azure Kinect (WFOV Unbinned)	
		L9	L10
0,25 m	Mostra (mm)	N/A	N/A
	Real (mm)	311	60
	Error (mm)	N/A	N/A
0,5 m	Mostra (mm)	327	51
	Real (mm)	311	60
	Error (mm)	16	9
1,00 m	Mostra (mm)	305	56
	Real (mm)	311	60
	Error (mm)	6	4
2,21 m	Mostra (mm)	N/A	N/A
	Real (mm)	311	60
	Error (mm)	N/A	N/A
2,88 m	Mostra (mm)	N/A	N/A
	Real (mm)	311	60
	Error (mm)	N/A	N/A
3,86 m	Mostra (mm)	N/A	N/A
	Real (mm)	311	60
	Error (mm)	N/A	N/A
5,36 m	Mostra (mm)	N/A	N/A
	Real (mm)	311	60
	Error (mm)	N/A	N/A

Taula A10 Rangos de la càmera de profunditat de la Azure Kinect (WFOV 2x2 Binned) per al blanc 1.

Distància al blanc 1		Azure Kinect (WFOV 2x2 Binned)																		
		A			B			C			D			E			L1	L2	L3	L4
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z				
0,25 m	Mostra (mm)	1	-50	286	-95	-110	288	97	48	278	-80	26	289	118	-124	275	N/A	372	36	38
	Real (mm)	0	-50	250	-95	-107	250	95	43	250	-75	23	250	113	-125	250	380	380	38	38
	Error (mm)	1	0	36	0	3	38	2	5	28	5	3	39	5	1	25	N/A	8	2	0
0,5 m	Mostra (mm)	-2	-49	521	-96	-107	522	96	52	521	-77	31	525	117	-123	518	380	376	36	35
	Real (mm)	0	-50	500	-95	-107	500	95	43	500	-75	23	500	113	-125	500	380	380	38	38
	Error (mm)	2	1	21	1	0	22	1	9	21	2	8	25	4	2	18	0	4	2	3
1,00 m	Mostra (mm)	5	-37	1028	-86	-98	1032	98	62	1023	-73	37	1030	120	-114	1024	360	355	33	34
	Real (mm)	0	-50	1000	-95	-107	1000	95	43	1000	-75	23	1000	113	-125	1000	380	380	38	38
	Error (mm)	5	13	28	9	9	32	3	19	23	2	14	30	7	11	24	20	25	5	4
2,21 m	Mostra (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Real (mm)	0	-50	2210	-95	-107	2210	95	43	2210	-75	23	2210	113	-125	2210	380	380	38	38
	Error (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
2,88 m	Mostra (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Real (mm)	0	-50	2880	-95	-107	2880	95	43	2880	-75	23	2880	113	-125	2880	380	380	38	38
	Error (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
3,86 m	Mostra (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Real (mm)	0	-50	3860	-95	-107	3860	95	43	3860	-75	23	3860	113	-125	3860	380	380	38	38
	Error (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
5,36 m	Mostra (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Real (mm)	0	-50	5360	-95	-107	5360	95	43	5360	-75	23	5360	113	-125	5360	380	380	38	38
	Error (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Taula A11 Rangs de la càmera de profunditat de la Azure Kinect (WFOV 2x2 Binned) per al blanc 2.

Distància al blanc 2		Azure Kinect (WFOV 2x2 Binned)				
		L5	L6	L7	L8	D1
0,25 m	Mostra (mm)	253	121	40	179	124
	Real (mm)	240	120	40	170	120
	Error (mm)	13	1	0	9	4
0,5 m	Mostra (mm)	248	122	40	178	123
	Real (mm)	240	120	40	170	120
	Error (mm)	8	2	0	8	3
1,00 m	Mostra (mm)	248	123	42	170	121
	Real (mm)	240	120	40	170	120
	Error (mm)	8	3	2	0	1
2,21 m	Mostra (mm)	242	N/A	37	N/A	115
	Real (mm)	240	120	40	170	120
	Error (mm)	2	N/A	3	N/A	5
2,88 m	Mostra (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Real (mm)	240	120	40	170	120
	Error (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
3,86 m	Mostra (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Real (mm)	240	120	40	170	120
	Error (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
5,36 m	Mostra (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Real (mm)	240	120	40	170	120
	Error (mm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Taula A12 Rangs de la càmera de profunditat de la Azure Kinect (WFOV 2x2 Binned) per al blanc 3.

Distància al blanc 3		Azure Kinect (WFOV 2x2 Binned)	
		L9	L10
0,25 m	Mostra (mm)	N/A	N/A
	Real (mm)	311	60
	Error (mm)	N/A	N/A
0,5 m	Mostra (mm)	324	57
	Real (mm)	311	60
	Error (mm)	13	3
1,00 m	Mostra (mm)	311	57
	Real (mm)	311	60
	Error (mm)	0	3
2,21 m	Mostra (mm)	N/A	N/A
	Real (mm)	311	60
	Error (mm)	N/A	N/A
2,88 m	Mostra (mm)	N/A	N/A
	Real (mm)	311	60
	Error (mm)	N/A	N/A
3,86 m	Mostra (mm)	N/A	N/A
	Real (mm)	311	60
	Error (mm)	N/A	N/A
5,36 m	Mostra (mm)	N/A	N/A
	Real (mm)	311	60
	Error (mm)	N/A	N/A

ANNEX 3. Resultats de l'assaig d'interior (taules expandides)

Taula A13 Resultats de l'assaig d'interior amb la Azure Kinect (NFOV Unbinned).

Distància		Azure Kinect (NFOV Unbinned)																			
		A				B				C				D				E			
		X	Y	Z	Mòdul	X	Y	Z	Mòdul	X	Y	Z	Mòdul	X	Y	Z	Mòdul	X	Y	Z	Mòdul
0,5 m	Mostra (mm)	1	-53	506	506	-93	-110	505	525	98	43	507	518	-75	22	507	513	117	-129	505	534
	Real (mm)	0	-50	500	502	-95	-107	500	520	95	43	500	511	-75	23	500	506	113	-125	500	528
	Error (mm)	1	-3	6	6	2	-3	5	5	3	0	7	7	0	-1	7	7	4	-4	5	7
1,0 m	Mostra (mm)	2	-51	1013	1014	-93	-110	1014	1024	98	43	1010	1016	-77	22	1011	1014	117	-128	1014	1029
	Real (mm)	0	-50	1000	1000	-95	-107	1000	1010	95	43	1000	1005	-75	23	1000	1003	113	-125	1000	1014
	Error (mm)	2	-1	13	13	2	-3	14	14	3	0	10	10	-2	-1	11	11	4	-3	14	15
2,0 m	Mostra (mm)	3	-48	2001	2001	-92	-107	2001	2006	99	47	2005	2008	-76	23	2004	2006	118	-127	2000	2007
	Real (mm)	0	-50	2000	2000	-95	-107	2000	2005	95	43	2000	2003	-75	23	2000	2002	113	-125	2000	2007
	Error (mm)	3	2	1	1	3	0	1	1	4	4	5	5	-1	0	4	4	5	-2	0	0
3,0 m	Mostra (mm)	5	-54	3006	3006	-90	-113	3012	3015	100	41	3004	3006	-72	23	3008	3009	118	-131	3007	3012
	Real (mm)	0	-50	3000	3000	-95	-107	3000	3003	95	43	3000	3002	-75	23	3000	3001	113	-125	3000	3005
	Error (mm)	5	-4	6	6	5	-6	12	12	5	-2	4	4	3	0	8	8	5	-6	7	7
4,0 m	Mostra (mm)	7	-56	4004	4004	-88	-111	4010	4013	102	39	4004	4005	-73	15	4006	4007	118	-136	4007	4011
	Real (mm)	0	-50	4000	4000	-95	-107	4000	4003	95	43	4000	4001	-75	23	4000	4001	113	-125	4000	4004
	Error (mm)	7	-6	4	4	7	-4	10	10	7	-4	4	4	2	-8	6	6	5	-11	7	7
5,0 m	Mostra (mm)	-2	-60	5002	5002	-90	-110	4996	4998	97	38	5003	5004	-71	18	5000	5001	117	-130	5000	5003
	Real (mm)	0	-50	5000	5000	-95	-107	5000	5002	95	43	5000	5001	-75	23	5000	5001	113	-125	5000	5003
	Error (mm)	-2	-10	2	2	5	-3	-4	-4	2	-5	3	3	4	-5	0	0	4	-5	0	0
5,36 m (paret)	Mostra (mm)	-2	-54	5347	5347	-86	-117	5346	5348	94	41	5351	5352	-76	31	5351	5352	115	-128	5350	5353
	Real (mm)	0	-50	5360	5360	-95	-107	5360	5362	95	43	5360	5361	-75	23	5360	5361	113	-125	5360	5363
	Error (mm)	-2	-4	-13	-13	9	-10	-14	-14	-1	-2	-9	-9	-1	8	-9	-9	2	-3	-10	-10

Taula A14 Resultats de l'assaig d'interior amb la Azure Kinect (WFOV Unbinned).

Distància		Azure Kinect (WFOV Unbinned)																			
		A				B				C				D				E			
		X	Y	Z	Mòdul	X	Y	Z	Mòdul	X	Y	Z	Mòdul	X	Y	Z	Mòdul	X	Y	Z	Mòdul
0,5 m	Mostra (mm)	0	-51	513	516	-97	-109	512	532	96	44	506	517	-77	24	506	512	117	-127	515	543
	Real (mm)	0	-50	500	502	-95	-107	500	520	95	43	500	511	-75	23	500	506	113	-125	500	528
	Error (mm)	0	-1	13	13	-2	-2	12	12	1	1	6	6	-2	1	6	6	4	-2	15	16
1,0 m	Mostra (mm)	2	-47	1008	1009	-92	-106	1008	1018	97	48	1003	1009	-76	26	1005	1008	116	-123	1009	1023
	Real (mm)	0	-50	1000	1001	-95	-107	1000	1010	95	43	1000	1005	-75	23	1000	1003	113	-125	1000	1014
	Error (mm)	2	3	8	8	3	1	8	8	2	5	3	3	-1	3	5	5	3	2	9	9
2,0 m	Mostra (mm)	3	-38	1995	1995	N/A	N/A	N/A	N/A	98	55	1984	1987	-76	36	1999	2001	N/A	N/A	N/A	N/A
	Real (mm)	0	-50	2000	2001	-95	-107	2000	2005	95	43	2000	2003	-75	23	2000	2002	113	-125	2000	2007
	Error (mm)	3	12	-5	-5	N/A	N/A	N/A	N/A	3	12	-16	-16	-1	13	-1	-1	N/A	N/A	N/A	N/A

Taula A15 Resultats de l'assaig d'interior amb la Kinect V2.

Distància		Kinect V2																			
		A				B				C				D				E			
		X(+X)	Y(-Z)	Z(+Y)	Mòdul	X(+X)	Y(-Z)	Z(+Y)	Mòdul	X(+X)	Y(-Z)	Z(+Y)	Mòdul	X(+X)	Y(-Z)	Z(+Y)	Mòdul	X(+X)	Y(-Z)	Z(+Y)	Mòdul
0,5 m	Mostra (mm)	4	-5	560	560	-89	-60	565	575	100	88	551	567	-71	71	554	563	117	-77	561	578
	Real (mm)	0	-20	528	528	-95	-77	528	542	95	73	528	541	-75	53	528	536	113	-95	528	548
	Error (mm)	4	15	32	32	6	17	37	33	5	15	23	25	4	18	26	27	4	18	33	30
1,0 m	Mostra (mm)	0	9	1053	1053	-92	-45	1056	1061	94	104	1052	1061	-74	83	1048	1054	113	-66	1060	1068
	Real (mm)	0	-20	1028	1028	-95	-77	1028	1035	95	73	1028	1035	-75	53	1028	1032	113	-95	1028	1039
	Error (mm)	0	29	25	25	3	32	28	26	1	31	24	26	1	30	20	22	0	29	32	30
2,0 m	Mostra (mm)	-12	44	2079	2080	-100	-11	2081	2083	86	137	2070	2076	-87	119	2067	2072	100	-30	2089	2092
	Real (mm)	0	-20	2028	2028	-95	-77	2028	2032	95	73	2028	2032	-75	53	2028	2030	113	-95	2028	2033
	Error (mm)	12	64	51	51	5	66	53	52	9	64	42	45	12	66	39	42	13	65	61	58

ANNEX 4. Taules amb les repeticions en l'estudi de precisió i exactitud per cada càmera i blanc

Taula A16 Resultats per les repeticions de l'estudi de precisió i exactitud amb la Azure Kinect (NFOV Unbinned) a 0,5 m amb el blanc 1.

0,5 m	Blanc 1 amb Azure Kinect (NFOV Unbinned)																			
	A				B				C				D				E			
Número de repetició	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector
1	2	-48	496	498,32	-95	-105	496	515,82	97	47	496	507,58	-75	28	492	498,47	116	-124	500	528,05
2	1	-48	495	497,32	-94	-104	495	514,47	97	48	497	508,65	-75	28	492	498,47	115	-124	500	527,83
3	2	-48	496	498,32	-94	-104	495	514,47	97	48	496	507,67	-75	28	492	498,47	116	-124	500	528,05
4	2	-48	496	498,32	-94	-105	496	515,63	97	48	496	507,67	-75	28	492	498,47	116	-124	499	527,10
5	2	-48	496	498,32	-95	-104	496	515,61	97	48	497	508,65	-75	29	492	498,53	117	-124	499	527,32
6	2	-48	496	498,32	-94	-105	496	515,63	97	48	496	507,67	-75	29	492	498,53	116	-123	500	527,81
7	1	-48	496	498,32	-94	-104	495	514,47	97	48	497	508,65	-75	27	492	498,42	116	-124	500	528,05
8	1	-48	496	498,32	-94	-104	496	515,43	97	48	496	507,67	-75	29	493	499,51	116	-124	500	528,05
9	2	-48	495	497,33	-94	-105	496	515,63	97	48	497	508,65	-75	28	492	498,47	117	-124	500	528,27
10	2	-48	496	498,32	-94	-104	495	514,47	97	47	496	507,58	-76	28	493	499,61	116	-124	500	528,05
Mitja mòduls (mm)	-	-	-	498,12	-	-	-	515,16	-	-	-	508,04	-	-	-	498,69	-	-	-	527,85

Taula A17 Resultats per les repeticions de l'estudi de precisió i exactitud amb la Azure Kinect (NFOV Unbinned) a 1,0 m amb el blanc 1.

1,0 m	Blanc 1 amb Azure Kinect (NFOV Unbinned)																			
	A				B				C				D				E			
Número de repetició	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector
1	2	-42	998	998,89	-94	-100	1004	1013,34	99	53	993	999,33	-75	33	993	996,37	117	-118	1003	1016,67
2	2	-42	998	998,89	-94	-100	1004	1013,34	99	53	993	999,33	-75	33	993	996,37	117	-119	1004	1017,78
3	2	-42	999	999,88	-94	-100	1004	1013,34	99	52	994	1000,27	-75	33	992	995,38	117	-119	1004	1017,78
4	2	-42	998	998,89	-94	-100	1003	1012,35	99	52	994	1000,27	-75	33	994	997,37	117	-119	1004	1017,78
5	2	-42	998	998,89	-94	-100	1003	1012,35	99	51	995	1001,21	-75	33	993	996,37	117	-119	1004	1017,78
6	2	-42	998	998,89	-94	-100	1003	1012,35	98	53	992	998,24	-75	33	993	996,37	119	-119	1004	1018,01
7	2	-42	998	998,89	-94	-100	1003	1012,35	99	53	996	1002,31	-75	33	993	996,37	117	-118	1003	1016,67
8	2	-42	999	999,88	-94	-100	1004	1013,34	99	51	993	999,23	-75	33	993	996,37	118	-119	1005	1018,88
9	2	-42	999	999,88	-94	-100	1003	1012,35	99	52	995	1001,26	-75	33	992	995,38	117	-119	1004	1017,78
10	2	-42	998	998,89	-94	-100	1004	1013,34	99	53	993	999,33	-75	33	991	994,38	117	-119	1004	1017,78
Mitja mòduls (mm)	-	-	-	999,19	-	-	-	1012,84	-	-	-	1000,08	-	-	-	996,08	-	-	-	1017,69



Taula A18 Resultats per les repeticions de l'estudi de precisió i exactitud amb la Azure Kinect (NFOV Unbinned) a 1,5 m amb el blanc 1.

1,5 m	Blanc 1 amb Azure Kinect (NFOV Unbinned)																			
	A				B				C				D				E			
Número de repetició	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector
1	-3	-54	1512	1512,97	-100	-111	1523	1530,31	95	41	1496	1499,57	-78	24	1510	1512,20	114	-132	1517	1526,99
2	-3	-53	1514	1514,93	-100	-111	1523	1530,31	92	41	1496	1499,39	-78	24	1509	1511,21	114	-132	1515	1525,01
3	0	-53	1514	1514,93	-100	-111	1522	1529,32	95	41	1496	1499,57	-78	24	1511	1513,20	114	-132	1517	1526,99
4	0	-53	1514	1514,93	-100	-114	1523	1530,53	92	40	1498	1501,36	-78	24	1511	1513,20	114	-132	1518	1527,99
5	-3	-54	1513	1513,97	-100	-111	1523	1530,31	95	41	1497	1500,57	-78	24	1511	1513,20	114	-132	1518	1527,99
6	0	-54	1512	1512,96	-100	-111	1521	1528,32	94	41	1495	1498,51	-78	24	1509	1511,21	114	-132	1518	1527,99
7	0	-53	1514	1514,93	-100	-111	1523	1530,31	95	41	1497	1500,57	-78	24	1511	1513,20	114	-132	1517	1526,99
8	0	-54	1511	1511,96	-100	-111	1522	1529,32	95	38	1498	1501,49	-78	24	1511	1513,20	114	-132	1518	1527,99
9	-3	-54	1512	1512,97	-97	-111	1523	1530,12	92	38	1498	1501,30	-78	24	1509	1511,21	114	-132	1516	1526,00
10	0	-54	1512	1512,96	-97	-111	1522	1529,12	94	41	1495	1498,51	-78	24	1509	1511,21	114	-132	1517	1526,99
Mitja mòduls (mm)	-	-	-	1513,75	-	-	-	1529,80	-	-	-	1500,09	-	-	-	1512,30	-	-	-	1527,09

Taula A19 Resultats per les repeticions de l'estudi de precisió i exactitud amb la Azure Kinect (NFOV Unbinned) a 2,0 m amb el blanc 1.

2,0 m	Blanc 1 amb Azure Kinect (NFOV Unbinned)																			
	A				B				C				D				E			
Número de repetició	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector
1	-5	-51	2012	2012,65	-105	-112	2022	2027,82	90	39	1998	2000,41	-84	23	2005	2006,89	111	-132	2013	2020,37
2	-5	-51	2011	2011,65	-105	-112	2021	2026,82	90	39	1999	2001,41	-84	23	2004	2005,89	111	-132	2014	2021,37
3	-5	-51	2011	2011,65	-105	-112	2022	2027,82	90	39	1997	1999,41	-84	23	2004	2005,89	111	-132	2013	2020,37
4	-5	-51	2012	2012,65	-105	-112	2023	2028,82	90	39	1997	1999,41	-84	23	2004	2005,89	111	-132	2014	2021,37
5	-5	-51	2013	2013,65	-104	-112	2020	2025,77	90	39	1998	2000,41	-84	23	2004	2005,89	111	-131	2012	2019,31
6	-5	-51	2011	2011,65	-104	-112	2020	2025,77	90	39	1997	1999,41	-84	24	2001	2002,91	111	-131	2012	2019,31
7	-5	-51	2011	2011,65	-105	-112	2023	2028,82	90	39	1998	2000,41	-84	24	2001	2002,91	111	-132	2016	2023,36
8	-5	-51	2011	2011,65	-105	-112	2023	2028,82	90	39	1999	2001,41	-84	23	2005	2006,89	111	-132	2014	2021,37
9	-5	-51	2010	2010,65	-105	-113	2024	2029,87	90	39	1998	2000,41	-84	23	2004	2005,89	111	-132	2014	2021,37
10	-5	-51	2011	2011,65	-105	-112	2021	2026,82	90	39	1998	2000,41	-84	23	2004	2005,89	111	-132	2014	2021,37
Mitja mòduls (mm)	-	-	-	2011,95	-	-	-	2027,72	-	-	-	2000,31	-	-	-	2005,49	-	-	-	2020,96

Taula A20 Resultats per les repeticions de l'estudi de precisió i exactitud amb la Azure Kinect (NFOV Unbinned) a 2,5 m amb el blanc 1.

2,5 m	Blanc 1 amb Azure Kinect (NFOV Unbinned)																			
	A				B				C				D				E			
Número de repetició	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector
1	-1	-54	2511	2511,58	-100	-115	2520	2524,60	93	34	2498	2499,96	-80	19	2502	2503,35	113	-134	2508	2514,12
2	-1	-55	2512	2512,60	-101	-116	2521	2525,69	93	39	2498	2500,03	-80	18	2505	2506,34	113	-135	2509	2515,17
3	-1	-55	2512	2512,60	-100	-115	2520	2524,60	93	34	2499	2500,96	-80	19	2503	2504,35	113	-134	2508	2514,12
4	-1	-55	2512	2512,60	-101	-116	2521	2525,69	93	39	2497	2499,04	-80	18	2506	2507,34	113	-135	2509	2515,17
5	-1	-55	2513	2513,60	-101	-116	2521	2525,69	93	39	2498	2500,03	-80	19	2508	2509,35	113	-135	2511	2517,16
6	-1	-55	2513	2513,60	-101	-116	2522	2526,69	93	34	2499	2500,96	-80	18	2505	2506,34	113	-135	2512	2518,16
7	-1	-54	2511	2511,58	-101	-116	2521	2525,69	93	33	2501	2502,95	-80	19	2508	2509,35	114	-135	2514	2520,20
8	-1	-54	2511	2511,58	-100	-115	2519	2523,61	93	38	2501	2503,02	-80	18	2504	2505,34	113	-135	2510	2516,17
9	-1	-55	2514	2514,60	-100	-115	2518	2522,61	93	33	2496	2497,95	-80	18	2504	2505,34	113	-135	2507	2513,17
10	-1	-54	2510	2510,58	-101	-116	2522	2526,69	93	34	2498	2499,96	-80	18	2505	2506,34	113	-135	2510	2516,17
Mitja mòduls (mm)	-	-	-	2512,49	-	-	-	2525,15	-	-	-	2500,49	-	-	-	2506,34	-	-	-	2515,96



Taula A21 Resultats per les repeticions de l'estudi de precisió i exactitud amb la Azure Kinect (NFOV Unbinned) a 0,5 m amb el blanc 2.

0,5 m	Blanc 2 amb Azure Kinect (NFOV Unbinned)																			
	A				B				C				D				E			
Número de repetició	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector
1	2	-49	503	505,39	-95	-105	504	523,51	98	47	501	512,65	-76	26	498	504,44	118	-124	512	539,86
2	2	-48	502	504,29	-95	-104	504	523,31	98	47	501	512,65	-76	26	497	503,45	117	-123	511	538,46
3	2	-48	502	504,29	-95	-105	504	523,51	98	47	501	512,65	-76	26	498	504,44	118	-124	512	539,86
4	2	-48	502	504,29	-95	-105	504	523,51	98	47	500	511,68	-76	26	497	503,45	118	-125	513	541,03
5	2	-49	503	505,39	-95	-105	504	523,51	98	47	501	512,65	-76	26	498	504,44	118	-125	513	541,03
6	2	-48	504	506,28	-95	-105	504	523,51	98	47	501	512,65	-76	26	498	504,44	118	-124	514	541,75
7	2	-48	502	504,29	-95	-105	504	523,51	98	47	501	512,65	-76	26	497	503,45	117	-124	512	539,64
8	2	-49	502	504,39	-95	-105	504	523,51	98	47	501	512,65	-76	26	498	504,44	117	-124	512	539,64
9	2	-49	503	505,39	-95	-105	504	523,51	98	47	501	512,65	-76	26	497	503,45	117	-125	513	540,82
10	2	-49	502	504,39	-95	-105	504	523,51	98	47	501	512,65	-76	26	498	504,44	117	-124	512	539,64
Mitja mòduls (mm)	-	-	-	504,84	-	-	-	523,49	-	-	-	512,56	-	-	-	504,04	-	-	-	540,17

Taula A22 Resultats per les repeticions de l'estudi de precisió i exactitud amb la Azure Kinect (NFOV Unbinned) a 1,0 m amb el blanc 2.

1,0 m	Blanc 2 amb Azure Kinect (NFOV Unbinned)																			
	A				B				C				D				E			
Número de repetició	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector
1	2	-43	1005	1005,92	-96	-100	1009	1018,48	97	51	1000	1005,99	-76	31	1001	1004,36	117	-120	1016	1029,73
2	2	-43	1005	1005,92	-97	-101	1011	1020,65	97	51	1000	1005,99	-76	31	1002	1005,36	117	-120	1016	1029,73
3	2	-43	1007	1007,92	-97	-101	1012	1021,64	97	51	1000	1005,99	-76	31	1002	1005,36	117	-120	1018	1031,70
4	2	-43	1006	1006,92	-94	-100	1009	1018,29	97	51	1000	1005,99	-76	31	1001	1004,36	117	-120	1016	1029,73
5	2	-43	1007	1007,92	-97	-101	1010	1019,66	97	51	1000	1005,99	-78	31	1003	1006,51	117	-120	1017	1030,72
6	2	-43	1006	1006,92	-97	-101	1011	1020,65	97	53	1001	1007,08	-76	31	1002	1005,36	117	-120	1016	1029,73
7	2	-43	1005	1005,92	-96	-100	1009	1018,48	97	51	1000	1005,99	-76	31	1001	1004,36	117	-120	1015	1028,74
8	2	-43	1006	1006,92	-96	-100	1009	1018,48	97	53	1001	1007,08	-76	31	1001	1004,36	117	-120	1015	1028,74
9	2	-43	1006	1006,92	-96	-100	1009	1018,48	97	51	1000	1005,99	-76	31	1002	1005,36	117	-120	1015	1028,74
10	2	-43	1005	1005,92	-95	-101	1010	1019,47	97	51	1000	1005,99	-78	31	1003	1006,51	117	-120	1015	1028,74
Mitja mòduls (mm)	-	-	-	1006,72	-	-	-	1019,43	-	-	-	1006,21	-	-	-	1005,19	-	-	-	1029,63

Taula A23 Resultats per les repeticions de l'estudi de precisió i exactitud amb la Azure Kinect (NFOV Unbinned) a 1,5 m amb el blanc 2.

1,5 m	Blanc 2 amb Azure Kinect (NFOV Unbinned)																			
	A				B				C				D				E			
Número de repetició	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector
1	-4	-55	1529	1529,99	-101	-112	1539	1546,37	93	38	1514	1517,33	-82	21	1520	1522,36	109	-131	1541	1550,39
2	-4	-54	1531	1531,96	-101	-113	1541	1548,44	93	38	1517	1520,32	-82	21	1520	1522,36	112	-131	1540	1549,61
3	-4	-54	1531	1531,96	-101	-112	1539	1546,37	93	38	1517	1520,32	-82	21	1519	1521,36	112	-131	1541	1550,61
4	-4	-54	1531	1531,96	-101	-112	1539	1546,37	93	38	1515	1518,33	-82	18	1520	1522,32	113	-131	1542	1551,67
5	-4	-54	1532	1532,96	-101	-112	1540	1547,37	93	41	1515	1518,41	-82	20	1521	1523,34	112	-131	1541	1550,61
6	-4	-54	1531	1531,96	-101	-112	1539	1546,37	93	41	1516	1519,40	-82	21	1522	1524,35	112	-131	1540	1549,61
7	-4	-54	1527	1527,96	-101	-112	1538	1545,38	93	41	1515	1518,41	-82	20	1521	1523,34	112	-131	1540	1549,61
8	-4	-54	1531	1531,96	-101	-112	1538	1545,38	93	38	1515	1518,33	-82	21	1522	1524,35	112	-132	1539	1548,71
9	-4	-54	1531	1531,96	-101	-112	1540	1547,37	93	38	1516	1519,33	-82	20	1521	1523,34	112	-132	1539	1548,71
10	-4	-55	1530	1530,99	-101	-112	1539	1546,37	93	38	1516	1519,33	-82	21	1522	1524,35	113	-131	1542	1551,67
Mitja mòduls (mm)	-	-	-	1531,36	-	-	-	1546,58	-	-	-	1518,95	-	-	-	1523,15	-	-	-	1550,12

Taula A24 Resultats per les repeticions de l'estudi de precisió i exactitud amb la Azure Kinect (NFOV Unbinned) a 2,0 m amb el blanc 2.

2,0 m	Blanc 2 amb Azure Kinect (NFOV Unbinned)																			
	A				B				C				D				E			
Número de repetició	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector
1	-5	-55	2015	2015,76	-105	-112	2021	2026,82	91	39	2007	2009,44	-84	20	2011	2012,85	107	-132	2022	2029,13
2	-5	-55	2013	2013,76	-105	-112	2021	2026,82	91	40	2009	2011,46	-84	19	2012	2013,84	107	-132	2021	2028,13
3	-5	-55	2013	2013,76	-105	-112	2021	2026,82	91	39	2007	2009,44	-84	20	2011	2012,85	107	-133	2019	2026,20
4	-5	-55	2014	2014,76	-105	-112	2022	2027,82	91	40	2010	2012,46	-84	19	2012	2013,84	109	-132	2022	2029,23
5	-5	-55	2015	2015,76	-105	-112	2021	2026,82	91	40	2009	2011,46	-84	20	2011	2012,85	107	-132	2022	2029,13
6	-5	-55	2017	2017,76	-107	-112	2021	2026,93	91	39	2008	2010,44	-84	20	2011	2012,85	107	-132	2021	2028,13
7	-5	-55	2014	2014,76	-104	-112	2019	2024,78	91	39	2008	2010,44	-84	19	2010	2011,84	107	-132	2022	2029,13
8	-5	-55	2014	2014,76	-105	-112	2021	2026,82	91	40	2010	2012,46	-84	19	2012	2013,84	107	-133	2019	2026,20
9	-5	-55	2014	2014,76	-105	-113	2024	2029,87	91	40	2009	2011,46	-84	20	2011	2012,85	107	-132	2022	2029,13
10	-5	-55	2012	2012,76	-105	-112	2021	2026,82	91	39	2007	2009,44	-84	19	2012	2013,84	107	-132	2023	2030,12
Mitja mòduls (mm)	-	-	-	2014,86	-	-	-	2027,03	-	-	-	2010,85	-	-	-	2013,15	-	-	-	2028,45

Taula A25 Resultats per les repeticions de l'estudi de precisió i exactitud amb la Azure Kinect (NFOV Unbinned) a 2,5 m amb el blanc 2.

2,5 m	Blanc 2 amb Azure Kinect (NFOV Unbinned)																			
	A				B				C				D				E			
Número de repetició	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector
1	-6	-54	2525	2525,58	-101	-111	2535	2539,44	94	39	2509	2511,06	-85	18	2513	2514,50	109	-131	2534	2539,72
2	-6	-55	2522	2522,61	-101	-111	2538	2542,43	89	39	2506	2507,88	-85	19	2511	2512,51	109	-131	2532	2537,73
3	-6	-55	2522	2522,61	-101	-111	2536	2540,44	93	39	2506	2508,03	-85	18	2513	2514,50	109	-131	2535	2540,72
4	-6	-55	2522	2522,61	-101	-111	2534	2538,44	93	39	2505	2507,03	-80	19	2512	2513,35	109	-131	2531	2536,73
5	-6	-55	2521	2521,61	-101	-111	2536	2540,44	93	38	2504	2506,01	-85	18	2514	2515,50	109	-131	2535	2540,72
6	-6	-54	2525	2525,58	-101	-111	2536	2540,44	93	39	2505	2507,03	-85	18	2513	2514,50	109	-131	2534	2539,72
7	-6	-55	2524	2524,61	-101	-111	2537	2541,43	94	39	2507	2509,06	-85	19	2516	2517,51	109	-132	2533	2538,78
8	-6	-55	2523	2523,61	-101	-111	2537	2541,43	93	38	2504	2506,01	-80	19	2512	2513,35	109	-131	2536	2541,72
9	-6	-55	2526	2526,61	-101	-111	2534	2538,44	93	39	2505	2507,03	-85	18	2513	2514,50	109	-132	2533	2538,78
10	-6	-55	2523	2523,61	-101	-111	2536	2540,44	93	39	2506	2508,03	-85	18	2514	2515,50	110	-131	2537	2542,76
Mitja mòduls (mm)	-	-	-	2523,90	-	-	-	2540,34	-	-	-	2507,72	-	-	-	2514,57	-	-	-	2539,74

Taula A26 Resultats per les repeticions de l'estudi de precisió i exactitud amb la Kinect V2 a 0,5 m amb el blanc 1.

0,5 m	Blanc 1 amb Kinect V2																			
	A				B				C				D				E			
Número de repetició	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector
1	2	-46	533	534,99	-93	-101	535	552,34	99	48	535	546,20	-74	29	530	535,93	114	-122	537	562,36
2	2	-46	533	534,99	-92	-101	531	548,29	99	46	533	544,06	-74	29	530	535,93	113	-122	535	560,25
3	2	-46	534	535,98	-93	-101	533	550,40	99	48	535	546,20	-73	29	529	534,80	115	-123	539	564,69
4	2	-45	534	535,90	-92	-101	531	548,29	100	47	535	546,29	-74	29	531	536,92	115	-122	536	561,61
5	2	-45	535	536,89	-93	-101	533	550,40	99	47	537	548,07	-74	29	531	536,92	115	-122	536	561,61
6	2	-46	535	536,98	-93	-101	533	550,40	99	46	534	545,04	-74	29	533	538,89	114	-123	540	565,44
7	1	-46	534	535,98	-93	-101	533	550,40	99	47	535	546,11	-74	29	531	536,92	115	-122	537	562,56
8	2	-45	534	535,90	-92	-101	532	549,26	99	47	535	546,11	-74	29	531	536,92	115	-122	537	562,56
9	2	-46	535	536,98	-93	-101	533	550,40	99	46	534	545,04	-74	29	531	536,92	115	-122	538	563,52
10	2	-46	536	537,97	-92	-101	532	549,26	99	47	535	546,11	-74	29	530	535,93	114	-122	538	563,32
Mitja mòduls (mm)	-	-	-	536,25	-	-	-	549,94	-	-	-	545,92	-	-	-	536,60	-	-	-	562,79

Taula A27 Resultats per les repeticions de l'estudi de precisió i exactitud amb la Kinect V2 a 1,0 m amb el blanc 1.

1,0 m	Blanc 1 amb Kinect V2																			
	A				B				C				D				E			
Número de repetició	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector
1	11	-19	1051	1051,23	-85	-72	1070	1075,78	106	70	1026	1033,83	-63	57	1047	1050,44	123	-97	1054	1065,58
2	11	19	1051	1051,23	-84	-72	1067	1072,72	106	70	1026	1033,83	-63	57	1047	1050,44	120	-97	1052	1063,26
3	11	-19	1050	1050,23	-85	-72	1069	1074,79	106	70	1025	1032,84	-63	57	1046	1049,44	120	-97	1051	1062,27
4	11	-19	1051	1051,23	-84	-72	1067	1072,72	106	70	1024	1031,85	-62	60	1043	1046,56	121	-97	1057	1068,32
5	11	-19	1052	1052,23	-85	-72	1069	1074,79	106	70	1026	1033,83	-63	60	1048	1051,60	123	-97	1053	1064,59
6	11	-19	1052	1052,23	-84	-72	1067	1072,72	106	70	1027	1034,83	-63	57	1044	1047,45	124	-97	1055	1066,68
7	11	-19	1051	1051,23	-84	-72	1068	1073,72	106	70	1025	1032,84	-63	57	1046	1049,44	120	-97	1053	1064,25
8	11	-19	1053	1053,23	-85	-72	1069	1074,79	106	70	1025	1032,84	-63	60	1048	1051,60	121	-97	1054	1065,35
9	11	-19	1053	1053,23	-84	-72	1066	1071,73	106	70	1024	1031,85	-63	57	1047	1050,44	123	-97	1051	1062,61
10	11	-19	1052	1052,23	-84	-72	1068	1073,72	106	70	1025	1032,84	-63	60	1046	1049,61	120	-97	1051	1062,27
Mitja mòduls (mm)	-	-	-	1051,83	-	-	-	1073,75	-	-	-	1033,14	-	-	-	1049,70	-	-	-	1064,52

Taula A28 Resultats per les repeticions de l'estudi de precisió i exactitud amb la Kinect V2 a 1,5 m amb el blanc 1.

1,5 m	Blanc 1 amb Kinect V2																			
	A				B				C				D				E			
Número de repetició	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector
1	-25	-46	1547	1547,89	-120	-102	1566	1573,90	70	-42	1524	1526,18	-97	34	1540	1543,43	89	-123	1558	1565,38
2	-25	-45	1546	1546,86	-120	-102	1565	1572,90	70	42	1522	1524,19	-97	34	1538	1541,43	89	-127	1554	1561,72
3	-25	-46	1548	1548,89	-120	-102	1563	1570,91	70	46	1523	1525,30	97	34	1539	1542,43	89	-123	1558	1565,38
4	-25	-45	1546	1546,86	-119	-102	1562	1569,84	70	42	1524	1526,18	-97	34	1537	1540,43	85	-122	1554	1561,10
5	-25	-45	1546	1546,86	-120	-102	1563	1570,91	70	46	1525	1527,30	-96	34	1536	1539,37	85	-122	1556	1563,09
6	-25	-45	1544	1544,86	-120	-102	1565	1572,90	70	46	1521	1523,30	-96	34	1536	1539,37	85	-123	1559	1566,15
7	-25	-45	1544	1544,86	-120	-102	1563	1570,91	70	46	1525	1527,30	-97	34	1538	1541,43	89	-127	1554	1561,72
8	-25	-45	1545	1545,86	-120	-102	1563	1570,91	70	46	1524	1526,30	-97	34	1538	1541,43	89	-122	1556	1563,31
9	-25	-45	1544	1544,86	-119	-101	1561	1568,78	70	46	1523	1525,30	-96	34	1535	1538,37	85	-122	1555	1562,09
10	-25	-46	1547	1547,89	-120	-102	1563	1570,91	70	46	1523	1525,30	-96	34	1534	1537,38	85	-122	1555	1562,09
Mitja mòduls (mm)	-	-	-	1546,57	-	-	-	1571,29	-	-	-	1525,67	-	-	-	1540,51	-	-	-	1563,20

Taula A29 Resultats per les repeticions de l'estudi de precisió i exactitud amb la Kinect V2 a 2,0 m amb el blanc 1.

2,0 m	Blanc 1 amb Kinect V2																			
	A				B				C				D				E			
Número de repetició	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector
1	-28	-78	2064	2065,66	-125	-129	2072	2079,77	67	17	2047	2048,17	-107	-4	2055	2057,79	79	-152	2076	2083,06
2	-28	-78	2062	2063,66	-125	-129	2072	2079,77	67	17	2045	2046,17	-106	-4	2050	2052,74	84	-152	2071	2078,27
3	-28	-78	2063	2064,66	-124	-129	2069	2076,72	67	17	2045	2046,17	-106	-4	2048	2050,75	84	-152	2072	2079,27
4	-28	-78	2062	2063,66	-125	-129	2072	2079,77	67	17	2046	2047,17	-107	-4	2051	2053,79	85	-152	2073	2080,30
5	-28	-78	2062	2063,66	-124	-129	2070	2077,72	67	17	2047	2048,17	-106	-4	2049	2051,74	84	-152	2071	2078,27
6	-28	-78	2063	2064,66	-124	-129	2069	2076,72	67	17	2044	2045,17	-107	-4	2053	2055,79	84	-152	2071	2078,27
7	-28	-78	2061	2062,67	-125	-135	2074	2082,14	67	17	2045	2046,17	-107	-4	2053	2055,79	85	-152	2076	2083,29
8	-28	-78	2063	2064,66	-124	-129	2070	2077,72	67	17	2049	2050,17	-106	-4	2050	2052,74	85	-158	2075	2082,74
9	-28	-78	2062	2063,66	-125	-129	2071	2078,78	67	17	2046	2047,17	-107	-4	2054	2056,79	84	-158	2072	2079,71
10	-28	-78	2062	2063,66	-124	-129	2068	2075,73	67	17	2044	2045,17	-106	-4	2050	2052,74	85	-152	2074	2081,30
Mitja mòduls (mm)	-	-	-	2064,06	-	-	-	2078,48	-	-	-	2046,97	-	-	-	2054,07	-	-	-	2080,45



Taula A30 Resultats per les repeticions de l'estudi de precisió i exactitud amb la Kinect V2 a 2,5 m amb el blanc 1.

2,5 m	Blanc 1 amb Kinect V2																			
	A				B				C				D				E			
Número de repetició	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector
1	-49	-61	2549	2550,20	-147	-118	2561	2567,93	48	28	2530	2530,61	-118	14	2537	2539,78	62	-139	2563	2567,52
2	-49	-61	2550	2551,20	-147	-118	2564	2570,92	48	28	2530	2530,61	-118	21	2537	2539,83	62	-139	2556	2560,53
3	-49	-61	2553	2554,20	-147	-118	2565	2571,92	48	28	2531	2531,61	-118	21	2539	2541,83	62	-146	2562	2566,91
4	-49	-61	2547	2548,20	-147	-118	2560	2566,93	48	28	2535	2535,61	-118	21	2539	2541,83	62	-146	2561	2565,91
5	-49	-61	2552	2553,20	-147	-118	2563	2569,92	48	28	2536	2536,61	-118	21	2541	2543,83	62	-139	2561	2565,52
6	-49	-61	2550	2551,20	-147	-118	2562	2568,93	48	28	2534	2534,61	-118	21	2538	2540,83	62	-139	2563	2567,52
7	-49	-61	2553	2554,20	-148	-118	2567	2573,97	48	21	2538	2538,54	-118	21	2542	2544,82	62	-139	2560	2564,52
8	-49	-61	2551	2552,20	-148	-118	2563	2569,98	48	28	2532	2532,61	-118	21	2543	2545,82	63	-139	2564	2568,54
9	-49	-61	2554	2555,20	-147	-118	2564	2570,92	48	21	2540	2540,54	-118	22	2546	2548,83	63	-139	2565	2569,54
10	-49	-61	2553	2554,20	-147	-118	2563	2569,92	48	21	2534	2534,54	-118	21	2541	2543,83	62	-139	2563	2567,52
Mitja mòduls (mm)	-	-	-	2552,40	-	-	-	2570,13	-	-	-	2534,59	-	-	-	2543,12	-	-	-	2566,40

Taula A31 Resultats per les repeticions de l'estudi de precisió i exactitud amb la Kinect V2 a 0,5 m amb el blanc 2.

0,5 m	Blanc 2 amb Kinect V2																			
	A				B				C				D				E			
Número de repetició	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector
1	N/A	N/A	N/A	N/A	-94	-100	526	543,61	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	115	-122	528	553,98
2	N/A	N/A	N/A	N/A	-94	-100	526	543,61	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	115	-122	528	553,98
3	N/A	N/A	N/A	N/A	-95	-99	522	539,73	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	114	-121	526	551,65
4	N/A	N/A	N/A	N/A	-94	-100	526	543,61	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	113	-121	526	551,44
5	N/A	N/A	N/A	N/A	-96	-100	525	542,99	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	113	-122	528	553,57
6	N/A	N/A	N/A	N/A	-95	-101	524	542,04	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	113	-123	529	554,74
7	N/A	N/A	N/A	N/A	-95	-102	529	547,06	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	113	-123	528	553,79
8	N/A	N/A	N/A	N/A	-96	-100	525	542,99	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	115	-123	529	555,15
9	N/A	N/A	N/A	N/A	-94	-101	525	542,83	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	115	-124	531	557,28
10	N/A	N/A	N/A	N/A	-94	-101	527	544,76	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	114	-123	530	555,90
Mitja mòduls (mm)	-	-	-	N/A	-	-	-	543,32	-	-	-	N/A	-	-	-	N/A	-	-	-	554,15

Taula A32 Resultats per les repeticions de l'estudi de precisió i exactitud amb la Kinect V2 a 1,0 m amb el blanc 2.

1,0 m	Blanc 2 amb Kinect V2																			
	A				B				C				D				E			
Número de repetició	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector
1	2	-22	1049	1049,23	-92	-77	1058	1064,78	101	68	1034	1041,14	-71	51	1045	1048,65	115	-103	1057	1068,21
2	2	-22	1053	1053,23	-92	-77	1058	1064,78	102	65	1037	1044,03	-71	51	1043	1046,66	115	-103	1057	1068,21
3	2	-25	1049	1049,30	-92	-77	1059	1065,77	102	68	1036	1043,23	-71	-52	1048	1051,69	115	103	1058	1069,20
4	2	-25	1050	1050,30	-92	-77	1056	1062,79	102	65	1038	1045,02	-71	51	1045	1048,65	115	103	1059	1070,19
5	2	-25	1049	1049,30	-92	-77	1058	1064,78	102	65	1038	1045,02	-71	51	1045	1048,65	115	-103	1057	1068,21
6	2	-25	1048	1048,30	-93	-78	1062	1068,91	102	65	1038	1045,02	-71	52	1047	1050,69	115	-103	1059	1070,19
7	2	-25	1047	1047,30	-93	-77	1060	1066,85	102	65	1036	1043,04	-71	52	1047	1050,69	115	-103	1057	1068,21
8	2	-25	1048	1048,30	-92	-77	1057	1063,79	102	65	1037	1044,03	-71	52	1049	1052,69	115	-103	1057	1068,21
9	2	-25	1050	1050,30	-92	-77	1057	1063,79	102	65	1039	1046,02	-71	52	1048	1051,69	116	-104	1061	1072,38
10	2	-25	1052	1052,30	-93	-77	1060	1066,85	102	65	1037	1044,03	-71	52	1047	1050,69	116	-104	1062	1073,37
Mitja mòduls (mm)	-	-	-	1049,79	-	-	-	1065,31	-	-	-	1044,06	-	-	-	1050,07	-	-	-	1069,64

Taula A33 Resultats per les repeticions de l'estudi de precisió i exactitud amb la Kinect V2 a 1,5 m amb el blanc 2.

1,5 m	Blanc 2 amb Kinect V2																			
	A				B				C				D				E			
Número de repetició	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector
1	-21	-46	1568	1568,82	-120	-98	1575	1582,60	76	45	1556	1558,50	-98	30	1564	1567,35	90	-124	1576	1583,43
2	-21	-46	1567	1567,82	-120	-98	1573	1580,61	76	47	1556	1558,56	-98	30	1559	1562,37	90	-124	1576	1583,43
3	-21	-46	1569	1569,81	-120	-98	1574	1581,61	76	47	1557	1559,56	-98	30	1562	1565,36	90	-124	1577	1584,43
4	-21	-46	1566	1566,82	-120	-98	1574	1581,61	76	47	1555	1557,57	-98	30	1562	1565,36	90	-124	1574	1581,44
5	-21	-46	1569	1569,81	-120	-98	1574	1581,61	76	47	1558	1560,56	-98	30	1561	1564,36	90	-124	1576	1583,43
6	-21	-46	1568	1568,82	-120	-98	1575	1582,60	76	47	1557	1559,56	-98	30	1561	1564,36	90	-124	1576	1583,43
7	-21	-46	1566	1566,82	-120	-98	1573	1580,61	76	47	1556	1558,56	-98	30	1560	1563,36	90	-124	1575	1582,44
8	-21	-46	1568	1568,82	-120	-98	1574	1581,61	76	47	1555	1557,57	-98	30	1559	1562,37	90	-124	1576	1583,43
9	-21	-46	1567	1567,82	-120	-98	1576	1583,60	76	47	1557	1559,56	-98	30	1561	1564,36	90	-124	1577	1584,43
10	-21	-46	1566	1566,82	-12	-98	1573	1576,10	76	47	1555	1557,57	-98	30	1561	1564,36	90	-124	1575	1582,44
Mitja mòduls (mm)	-	-	-	1568,22	-	-	-	1581,25	-	-	-	1558,76	-	-	-	1564,36	-	-	-	1583,23

Taula A34 Resultats per les repeticions de l'estudi de precisió i exactitud amb la Kinect V2 a 2,0 m amb el blanc 2.

2,0 m	Blanc 2 amb Kinect V2																			
	A				B				C				D				E			
Número de repetició	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector
1	-28	-55	2067	2067,92	-125	-107	2070	2076,53	67	40	2064	2065,47	-119	29	2064	2067,63	79	-135	2080	2085,87
2	-28	-55	2071	2071,92	-125	-107	2074	2080,52	67	40	2063	2064,48	-119	29	2066	2069,63	79	-136	2083	2088,93
3	-28	-55	2071	2071,92	-124	-106	2069	2075,42	67	40	2065	2066,47	-119	29	2066	2069,63	79	-135	2080	2085,87
4	-28	-55	2070	2070,92	-125	-106	2071	2077,47	67	40	2064	2065,47	-118	29	2063	2066,58	79	-135	2078	2083,88
5	-28	-55	2072	2072,92	-125	-107	2074	2080,52	67	40	2064	2065,47	-119	29	2069	2072,62	79	-136	2083	2088,93
6	-28	-55	2070	2070,92	-125	-107	2073	2079,52	67	40	2065	2066,47	-119	29	2064	2067,63	79	-136	2083	2088,93
7	-28	-55	2068	2068,92	-125	-106	2071	2077,47	67	40	2061	2062,48	-119	29	2065	2068,63	79	-135	2080	2085,87
8	-28	-55	2071	2071,92	-125	-107	2074	2080,52	67	40	2067	2068,47	-119	29	2068	2071,62	79	-136	2083	2088,93
9	-28	-55	2070	2070,92	-125	-107	2074	2080,52	67	40	2064	2065,47	-119	29	2066	2069,63	79	-136	2083	2088,93
10	-28	-55	2071	2071,92	-125	-106	2071	2077,47	67	40	2065	2066,47	-119	29	2066	2069,63	79	-136	2083	2088,93
Mitja mòduls (mm)	-	-	-	2071,02	-	-	-	2078,60	-	-	-	2065,67	-	-	-	2069,32	-	-	-	2087,51

Taula A35 Resultats per les repeticions de l'estudi de precisió i exactitud amb la Kinect V2 a 2,5 m amb el blanc 2.

2,5 m	Blanc 2 amb Kinect V2																			
	A				B				C				D				E			
Número de repetició	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector	X	Y	Z	Mòdul vector
1	-35	-62	2575	2575,98	-149	-119	2591	2598,01	62	29	2556	2556,92	-105	15	2562	2564,19	78	-141	2597	2601,99
2	-35	-62	2579	2579,98	-149	-119	2594	2601,00	62	29	2557	2557,92	-105	15	2562	2564,19	78	-141	2595	2600,00
3	-35	-62	2575	2575,98	-149	-119	2591	2598,01	62	29	2558	2558,92	-105	15	2561	2563,20	78	-148	2600	2605,38
4	-35	-62	2579	2579,98	-149	-119	2589	2596,01	62	29	2554	2554,92	-105	15	2558	2560,20	77	-148	2594	2599,36
5	-35	-62	2577	2577,98	-149	-119	2586	2593,02	62	29	2553	2553,92	-105	15	2562	2564,19	78	-141	2597	2601,99
6	-35	-62	2576	2576,98	-149	-119	2589	2596,01	62	29	2561	2561,91	-119	21	2559	2561,85	78	-141	2599	2603,99
7	-35	-62	2577	2577,98	-149	-119	2588	2595,02	62	29	2554	2554,92	-105	15	2560	2562,20	77	-141	2594	2598,97
8	-35	-62	2580	2580,98	-149	-119	2587	2594,02	62	29	2559	2559,92	-105	15	2563	2565,19	78	-141	2595	2600,00
9	-35	-62	2575	2575,98	-149	-119	2587	2594,02	62	29	2555	2555,92	-105	15	2559	2561,20	78	-141	2597	2601,99
10	-35	-62	2576	2576,98	-149	-119	2585	2592,02	62	29	2555	2555,92	-105	15	2559	2561,20	78	-141	2595	2600,00
Mitja mòduls (mm)	-	-	-	2577,88	-	-	-	2595,71	-	-	-	2557,12	-	-	-	2562,76	-	-	-	2601,37

ANNEX 5. Resultats de l'assaig d'exterior

Taula A36 Resultats de l'assaig d'exterior amb la Azure Kinect (NFOV Unbinned).

Distància		Azure Kinect (NFOV Unbinned)														
		A			B			C			D			E		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0,5 m	Mostra (mm)	1	-24	506	-94	-80	510	99	68	506	-74	54	507	115	-101	509
	Real (mm)	0	-50	500	-95	-107	500	95	43	500	-75	23	500	113	-125	500
	Error (mm)	1	26	6	1	27	10	4	25	6	1	31	7	2	24	9
1,0 m	Mostra (mm)	2	6	1010	-94	-49	1010	99	99	1012	-73	83	1011	116	-70	1013
	Real (mm)	0	-50	1000	-95	-107	1000	95	43	1000	-75	23	1000	113	-125	1000
	Error (mm)	2	56	10	1	58	10	4	56	12	2	60	11	3	55	13
2,0 m	Mostra (mm)	3	60	2026	-93	8	2030	100	155	2016	-73	135	2013	116	-12	2036
	Real (mm)	0	-50	2000	-95	-107	2000	95	43	2000	-75	23	2000	113	-125	2000
	Error (mm)	3	110	26	2	115	30	5	112	16	2	112	13	3	113	36
3,0 m	Mostra (mm)	5	106	3000	-90	53	3001	100	202	3003	-72	184	2999	118	35	3008
	Real (mm)	0	-50	3000	-95	-107	3000	95	43	3000	-75	23	3000	113	-125	3000
	Error (mm)	5	156	0	5	160	1	5	159	3	3	161	-1	5	160	8
4,0 m	Mostra (mm)	-1	157	3996	-96	102	4001	94	252	3994	-73	228	3997	N/A	N/A	N/A
	Real (mm)	0	-50	4000	-95	-107	4000	95	43	4000	-75	23	4000	113	-125	4000
	Error (mm)	-1	207	-4	-1	209	1	-1	209	-6	2	205	-3	N/A	N/A	N/A
5,0 m	Mostra (mm)	NO ES VA PODER MEDIR, NOMÉS ES VA FER CAPTURA A NIVELL QUALITATIU PER VEURE COM ERA LA RESOLUCIÓ A UNA DISTÀNCIA SUPERIOR A 4 METRES														
	Real (mm)															
	Error (mm)															